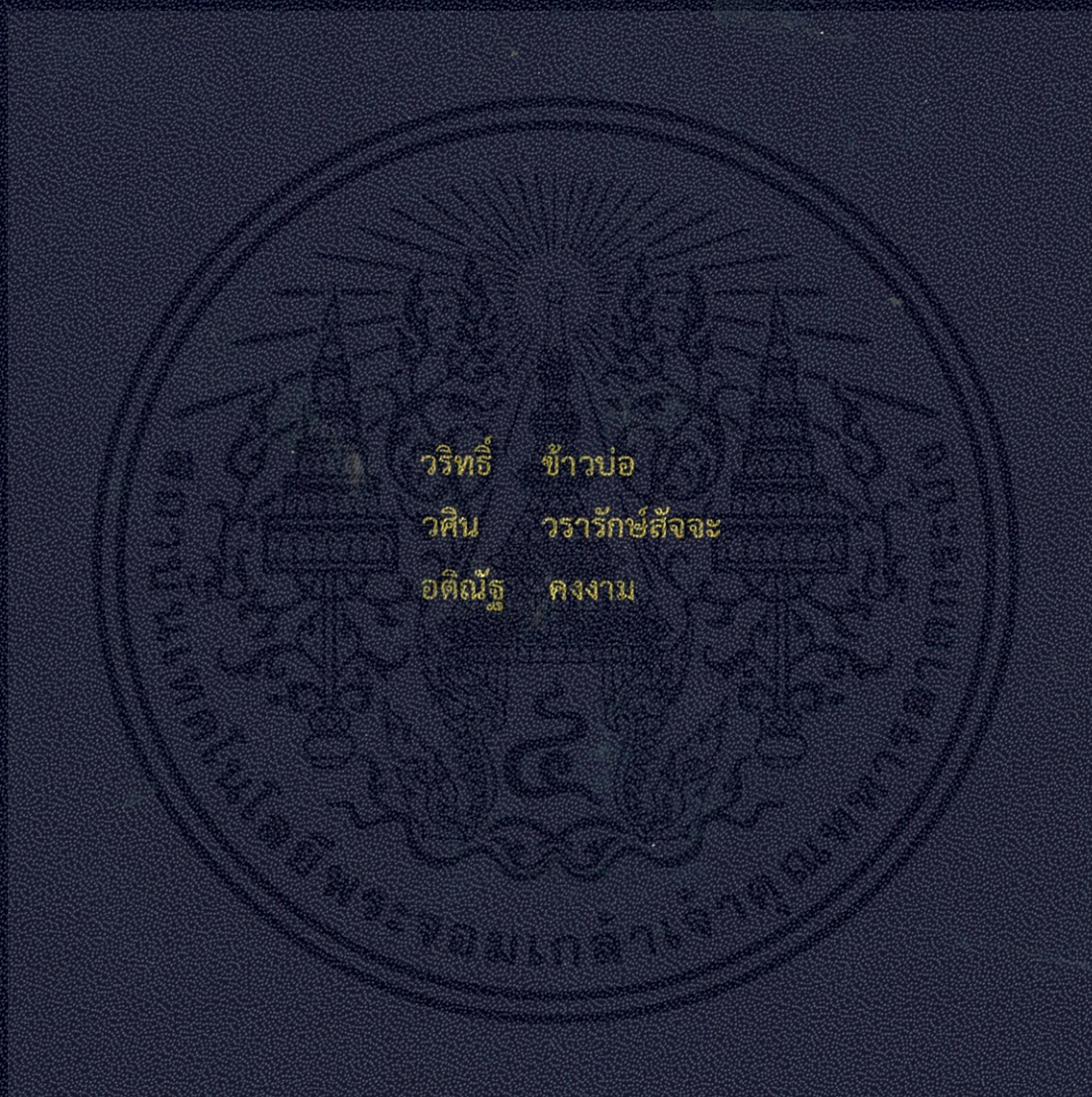


การสร้างลูกตุ้มผกผันเพื่อศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ

BUILDING INVERTED PENDULUM FOR STUDYING IN AUTOMATIC CONTROL



ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การสร้างลูกตุ้มผกผันเพื่อศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ

BUILDING INVERTED PENDULUM FOR STUDYING IN AUTOMATIC CONTROL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Building Inverted Pendulum for Studying in Automatic Control



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 2013 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างลูกตุ้มผกผันเพื่อศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ
Building Inverted Pendulum for Studying in Automatic Control

ผู้จัดทำ

นาย วรสิทธิ์	ข้าวบ่อ	รหัสประจำตัว	53011427
นาย วศิน	วรารักษ์สัจจะ	รหัสประจำตัว	53011441
นาย อติณัฐ	คางงาม	รหัสประจำตัว	53011829



(ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดิโปวา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

รายชื่อนักศึกษา

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

การสร้างลูกตุ้มผกผันเพื่อศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ

นายวริทธิ์ ข้าวบ่อ

รหัสนักศึกษา 53011427

นายวศิน วรารักษ์สัจจะ

รหัสนักศึกษา 53011441

นายอดิษฐ์ คงงาม

รหัสนักศึกษา 53011829

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

วิศวกรรมเครื่องกล

2556

ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไพบวา

อาจารย์ สมบูรณ์ เนียมกล้า

บทคัดย่อ

ระบบลูกตุ้มหัวกลับประกอบด้วยลูกตุ้มที่หมุนได้อย่างอิสระวางเลื่อนที่เคลื่อนที่ได้ในแนวระดับที่ถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ระบบลูกตุ้มหัวกลับมีความสำคัญด้านการศึกษาพื้นฐานระบบควบคุมและเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุม ในอดีตระบุว่าหากออกแบบตัวควบคุมไม่เหมาะสม ระบบจะไม่ทนทานต่อสิ่งรบกวนจากแรงภายนอก และมุมเอียงของลูกตุ้ม และตำแหน่งที่วางเลื่อนจะแกว่ง จนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ได้ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองลูกตุ้มหัวกลับมีความซับซ้อนเป็นระบบควบคุมแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต และยังเป็นระบบแบบ Under-actuated จึงเป็นการยากที่จะออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมที่มีประสิทธิภาพในการควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวควบคุม PID ร่วมกับเทคนิคฟิวชันฟังก์ชัน ทำให้สามารถลดจำนวนอินพุตเข้าสู่ตัวควบคุม เพื่อความสะดวกในการพัฒนาตัวควบคุมกับระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Inverted Pendulum for Studying in Automatic Control		
Student	Mr. Warit	Kawbor	Student ID. 53011427
	Mr. Wasin	Wararuksajja	Student ID. 53011441
	Mr. Atinat	Khongngam	Student ID. 53011829
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Mechanical Engineering		
Year	2013		
Thesis Advisor	Dr.Nattawoot Depaiwa		
	Mr.Somboon Niumklum		

ABSTRACT

An inverted pendulum consists of a pendulum and a cart that is actuated from a DC motor. An inverted pendulum system is important in control engineering study. It is an unstable system that needs a controller to achieve its stability. Past research has specified that an unsuitable controller cannot reject a plant disturbance, therefore the controller can't maintain a pendulum inclination angle and a cart position because the system becomes unstable. However, the mathematical model of the inverted pendulum is a complicated, multi-input system, multi-output system and it is under-actuated. Therefore it is difficult to develop the controller using a conventional controller. In this paper we will present the 'PID controller' and the 'fusion function'. Therefore, it is easier and time efficient to develop a controller algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ถ้ามิได้รับการอบรมสั่งสอนวิชาความรู้คำแนะนำและคำปรึกษา จาก ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา ซึ่งได้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทนี้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สมบูรณ์ เนียมกล้า สำหรับคำแนะนำในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่อบรมสั่งสอนทั้งให้คำปรึกษา โดยมีเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้การแนะนำที่ดีและมีประโยชน์กับการทำปริญญาโทนี้เป็นอย่างดีจนทำให้ปริญญาโทนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่เคารพรักที่ให้อุปการะและสนับสนุนการศึกษาอย่างดียิ่งตลอดมา รวมถึงผู้มีพระคุณที่ช่วยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำปริญญาโทนี้

หากว่าปริญญาโทนี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำปริญญาโทนี้ต้องขออภัยมา ณ ที่นี้และยินดีน้อมรับข้อบกพร่องทุกประการ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

นายวิฑูรย์ ชำบ่อ
นายศิน วรารักษ์สัจจะ
นายอดิษฐ์ คงงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้.....	5
2.1 ทฤษฎี Inverted Pendulum.....	5
2.1.1 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง.....	5
2.1.2 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์.....	6
2.1.3 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรแมคคานิคอลและสมการควบคุมความเร็ว.....	7
2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	7
2.3 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง.....	13
2.4 ออปติคอลเอ็นโค้ดเดอร์.....	14
2.5 ระบบควบคุม PID.....	19
2.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบควบคุม PID.....	19
2.5.2 แบบจำลองกระบวนการทำงาน.....	21
2.5.3 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุม PID.....	24
2.5.4 ลักษณะการทำงานของตัวควบคุม PID.....	28
2.5.5 การออกแบบระบบควบคุม PID.....	28
2.5.6 สรุปสาระสำคัญ.....	34
2.6 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดลูกตุ้มผกผัน.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	43
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	43

สารบัญ(ต่อ)

3.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์.....	46
3.3 วงจรควบคุมและประมวลผล.....	47
3.4 โปรแกรมหลักลูกตุ้มผกผัน.....	48
3.5 โปรแกรมควบคุมการทำงาน.....	54
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	56
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินงาน.....	56
4.2.1 การแสดงค่ามุม ระยะทาง error.....	56
4.2.2 ผลการปรับจูน.....	61
4.2 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	64
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	64
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การ XOR ด้วยค่าต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานแต่ละชนิดของตัวควบคุม PID	28
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าที่ได้จากวิธีการตอบสนองความไวสูงสุดของ Zeigler และ Nichole.....	32
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการตอบสนอง Step Response ของ Zeigler และ Nichole.....	32
ตารางที่ 2.5 แสดงวิธีการปรับจูนของ Chien-Hronse-Reswick.....	33
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของ PI - Control , PD - Control และ PID - Control	41
ตารางที่ 2.7 แสดงเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ P - Control , I - Control และ D - Control.....	41
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการจัดทำปริญญานิพนธ์.....	45
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K1 คงที่	61
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K2 คงที่	62
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K3 คงที่	62
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K4 คงที่	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

ภาพ 2.1 แสดง Free – Body Diagram ของ Inverted Pendulum.....	5
ภาพ 2.2 แสดงวงจรรูปในของมอเตอร์กระแสตรง.....	7
ภาพ 2.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของโมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์.....	8
ภาพ 2.4 แสดงโมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระตุ้น.....	9
ภาพ 2.5 แสดงถึงแรงบิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์.....	10
ภาพ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล.....	11
ภาพ 2.7 แสดงวงจรมอเตอร์แบบ H-Bridge	14
ภาพ 2.8 แสดงแผ่นอปติคอลลเ็นโค้ดเดอร์ทั้งสองแบบ.....	14
ภาพ 2.9 แสดงโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์.....	15
ภาพ 2.10 แสดงการสร้างสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์.....	16
ภาพ 2.11 แสดงสัญญาณพัลส์ของโรตารีแบบสองเฟส.....	16
ภาพ 2.12 แสดงการตรวจเช็คสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์.....	17
ภาพ 2.13 ลักษณะสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ทั้งสองเฟส.....	17
ภาพ 2.14 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์.....	18
ภาพ 2.15 แสดงบล็อกไดอะแกรมการใช้งานของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์.....	19
ภาพ 2.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	20
ภาพ 2.17 แสดงภาพ Step Response ของกระบวนการควบคุมด้วยตัวเอง.....	22
ภาพ 2.18 แสดงภาพ Step Response ของกระบวนการ Integrating.....	23
ภาพ 2.19 แสดงภาพการแกว่งของสัญญาณตอบสนองเข้าสู่ Set Point.....	25
ภาพ 2.20 แสดงภาพช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาที่กำหนดไว้.....	26
(ก) ช่วงเวลาขาขึ้น.....	26
(ข) ช่วงเวลาที่กำหนด.....	26
ภาพ 2.21 แสดงภาพการตอบสนองทั่วไปของระบบ PID.....	34
(ก) การตอบสนองต่อสัญญาณของ Unit Step เข้าสู่ Set Point.....	34
(ข) การตอบสนองต่อสัญญาณของ Unit Step ต่อสัญญาณรบกวน.....	34
ภาพ 2.22 แสดงภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของปฏิกิริยาทางกลเพื่อรักษาระบบ.....	35
ภาพ 2.23 แสดงภาพการตอบสนองสัญญาณในรูปแบบสมการอันดับสองของระบบ PID.....	37

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
(ก) การตอบสนองต่อสัญญาณของ Unit Step เข้าสู่ Set Point.....	37
(ข) การตอบสนองต่อสัญญาณของ Unit Step ต่อสัญญาณรบกวน.....	37
ภาพ 2.24 แสดงภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการอันดับสอง.....	38
ภาพ 2.25 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน.....	41
ภาพ 3.1 แสดงแผนผังการทำปฏิกิริยานิพนธ์.....	43
ภาพ 3.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ H Bridge.....	46
ภาพ 3.3 วงจรควบคุมและประมวลผล.....	47
ภาพ 3.4 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม.....	54
ภาพ 3.5 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานของมอเตอร์.....	55
ภาพ 4.1 แสดงค่ามุม ระยะทางและError.....	56
ภาพ 4.2 ผลการวัดค่าเมื่อลูกตุ้มเอียงไปทางด้านขวา.....	57
ภาพ 4.3 ผลการวัดค่าเมื่อลูกตุ้มเอียงไปทางด้านซ้าย.....	57
ภาพ 4.4 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านขวา.....	58
ภาพ 4.5 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้าย.....	58
ภาพ 4.6 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านขวาและลูกตุ้มเอียงไปทางด้านซ้าย.....	59
ภาพ 4.7 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้ายและลูกตุ้มเอียงไปทางด้านขวา.....	59
ภาพ 4.8 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้ายและลูกตุ้มเอียงไปทางด้านซ้าย.....	60
ภาพ 4.9 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้ายและลูกตุ้มเอียงไปทางด้านขวา.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบควบคุมมีบทบาทอย่างยิ่งในชีวิตประจำวันและวงการอุตสาหกรรมตัวอย่าง เช่น ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ ระบบควบคุมอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ และระบบควบคุมการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น

การศึกษาระบบควบคุมทั้งทางด้านทฤษฎีและการปฏิบัติ จะต้องศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆ ของตัวแปร ในระบบควบคุม ที่มีผลต่อการทำงานของระบบเป็นอย่างดี จึงจะทำให้เราเข้าใจกระบวนการการทำงานได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพและปลอดภัยไม่เกิดความเสียหาย ที่สำคัญคือสามารถออกแบบระบบควบคุมให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมที่ไม่มีเสถียรภาพ หรือระบบที่ไม่สามารถทำงานได้ถ้าปราศจากการระบอบควบคุมอื่นๆ

ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาระบบควบคุมโดยเลือกแบบจำลองการควบคุมที่เรียกว่า ลูกตุ้มผกผัน (Inverted Pendulum) เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่แสดงถึงกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพและมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อแรงที่มากระทำต่อลูกตุ้มผกผัน โดยใช้หลักการเหมือนกับการเลี้ยงแท่งไม้ไว้บนมือ โดยพยายามเลี้ยงลูกตุ้มเพื่อรักษาสมดุลไม่ให้ลูกตุ้มล้มเนื่องจากลูกตุ้มมีอิสระในการเคลื่อนที่ โดยมีจุดสมดุลเพียงจุดเดียวเท่านั้น คือจุดที่ตั้งฉากกับแนวราบ ดังนั้นถ้าไม่มีการควบคุมเมื่อมีแรงมากระทำต่อลูกตุ้มจะทำให้ลูกตุ้มล้ม เป้าหมายของการควบคุมคือการเลี้ยงลูกตุ้มผกผันโดยจะต้องมีความเร็วของจุดหมุนที่ฐานของลูกตุ้มมากกว่าความเร็วของการล้มของลูกตุ้ม เพื่อให้ลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล เหตุผลที่เลือกทำการศึกษาลูกตุ้มผกผันนี้ เนื่องจากสามารถนำความรู้ทางทฤษฎีของลูกตุ้มผกผันมาใช้ในการศึกษาการควบคุมแบบอัตโนมัติ เพราะระบบการทำงานในลักษณะนี้จะอาศัยการเรียนรู้การล้มแบบอิสระของลูกตุ้มในเหตุการณ์จริงแล้วตอบสนองเพื่อป้องกันการล้ม และสามารถเลี้ยงลูกตุ้มไว้ในตำแหน่งที่มีความสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิจัยเกี่ยวกับอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ผ่านมา

การศึกษาดินเวอร์ทเพนดูลัมนั้น เป็นตัวอย่างของการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบทั่วไป ซึ่งมักจะเริ่มจากควบคุมระบบทางกลที่ไม่ซับซ้อน อินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นตัวอย่างอันหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ศึกษาถึงผลของชุดควบคุมที่มีผลต่อการทำงานของระบบ เนื่องจากอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบที่ไม่เสถียรและจะทำงานไม่ได้ถ้าไม่มีชุดควบคุม การควบคุมการทำงานของอินเวอร์ทเพนดูลัมได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงเรื่อยมาดังนี้

Schaefer และ Cannon (ค.ศ.1966) ได้ออกแบบชุดทดลองของอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้ทฤษฎี Bang-bang control ซึ่งปรับค่าของแรงกระทำที่ให้กับระบบได้เพียง 3 ชั้นคือ บวก ลบ และศูนย์ ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bryson และ Luenberger (ค.ศ.1970) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้วิธีของ State variable และการประเมินค่าตัวแปรของ Luenberger ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ประยุกต์ไปสู่การควบคุมการปล่อยจรวดในเวลาต่อมา

Strugeron และ Loscutoff (ค.ศ.1972) ได้ออกแบบชุดควบคุมของระบบดับเบิลอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้อนาล็อกคอมพิวเตอร์เป็นชุดประมาณค่าตัวแปร และชุดควบคุม

Shozo Mori , Hiroyshi Nishihara และ Katsuhisa Furuta (ค.ศควบคุมการทำงานของอินเวอร์ (1975. ทเพนดูลัมโดยใช้วิธีBang-bang control ในตอนแรกเพื่อดีงเพนดูลัมจากตำแหน่งอิสระตามธรรมชาติ ให้มาอยู่ในตำแหน่งกลับหัวตามต้องการ แล้วจึงใช้ออนาล็อกคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมให้อินเวอร์ทเพนดูลัมเลี้ยงตัวเองได้ในสภาพกลับหัวต่อไปและใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณ Bang-bang control ในช่วงแรกก่อนที่จะตัดระบบไปสู่ชุดควบคุมแบบ อนาล็อกต่อไป

Furuta (ค.ศ.1978) ได้ทำการพัฒนาชุดควบคุมต่อมาโดยเปลี่ยนชุดควบคุมทั้งหมดมาเป็นมินิคอมพิวเตอร์แบบ Nova 1200 มาเป็นชุดควบคุมทั้งหมดแต่ยังคงใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบอนาล็อก (วิธี State space) เช่นเดิม ซึ่งทำให้สามารถใช้ Sampling period เพียง 4 ms

W.Maletinky , M.F senning และ F.wiederkehr (ค.ศ.1981) ออกแบบชุดควบคุมดับเบิลอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้ชุดควบคุมแบบอนาล็อก

W.Duchting , W.Schonberger , U.Gotte และ P.Arndt (ค.ศ.1983) เปลี่ยนรูปแบบระบบจากอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบลูกเหล็กกลิ้งอยู่บนรางโค้งบนตัวรถแต่ความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ ยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม และยังสร้างเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของรากสมการคุณลักษณะ เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราขยายแต่ละตัว

Feng Zu-ren , Yin Zheng และ Chen Hui-tang (ค.ศ.1987) สร้างชุดควบคุมดับเบิลอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TP-801 เป็นชุดควบคุมและใช้ทฤษฎีควบคุมแบบดิจิตอลในการหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม โดยการสร้าง Discrete state equation ทำให้ใช้ค่า Sampling period ได้สูงถึง 20 ms

อาจารย์พงษ์เทพ วิทิสัตตา (ค.ศ.1990) ทดลองออกแบบสร้างชุดทดลองอินเวอร์ทเพนดูลัม เพื่อใช้ในการศึกษาทฤษฎีควบคุมของระบบที่ไม่เสถียรให้สามารถทำงานได้ อินเวอร์ทเพนดูลัมที่ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบข้อต่อเดี่ยว (Single pendulum) ซึ่งติดอยู่บนตัวรถซึ่งวางอยู่บนรางแนวระนาบที่มีระยะการเคลื่อนที่ 0.2 เมตร มีแกนของเพนดูลัมยาว 0.22 เมตร มวลของตุ้มน้ำหนัก 31 กรัม ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 108 วัตต์ โดยส่งแรงผ่านมู่เลย์และรอกมีการเคลื่อนที่ในสองลักษณะคือไปและกลับ การควบคุมใช้ทฤษฎีควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธี State space ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ PC AT 80286 ความเร็ว 8 MHz เป็นตัวควบคุม และชุดประมาณค่าตัวแปร (Observer) ก่อนที่จะเริ่มควบคุม และใช้โปรแกรมส่วน On line คำนวณค่าอัตราขยาย เพื่อป้อนกลับไปควบคุมการทำงานของระบบ การหาอัตราขยายของชุดควบคุมสามารถทำได้สองวิธีคือ การกำหนดรากสมการคุณลักษณะของระบบวงปิดของระบบ (Pole placement technique) และวิธีที่สองคือ การหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้สมการ Linear quadratic (Linear quadratic optimum control) ในรูปแบบของสมการ

Riccati การเลือกวิธีควบคุมและการป้อนข้อมูล จะรับค่าต่างๆทางแป้นพิมพ์ จากการทดลองพบว่า ระบบทำงานได้ดีเมื่อควบคุมโดยการกำหนดรากสมการคุณลักษณะและมีการแสดงผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของรากสมการคุณลักษณะของระบบวงปิดและของชุดประมาณค่าตัวแปร ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงค่าของ Sampling period แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางกล ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมได้โดยใช้วิธีการหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้สมการ Linear quadratic ได้ เนื่องจากค่าคงตัวของระบบที่คำนวณได้วิธีนี้จะมีค่าประมาณมากกว่า 2 วินาทีขึ้นไป จึงจำเป็นต้องใช้ระยะในการวิ่งของรถมากกว่า 0.2 เมตรที่มีอยู่ ทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานได้

นายอัษฎายุทธ รุธิรโก และพัฒน จาตกานนท์ (ค.ศ.1991) ศึกษาทฤษฎีควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธี State space ซึ่งประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบเพื่อ (Mathematical model) ทาสมาการ การเคลื่อนที่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล และจัดเรียงสมการให้อยู่ในรูปของสมการตัวแปรสถานะ (State equation) ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในระบบ ที่อยู่ในรูปของสมการเมทริก $x = AX + BU$ และเมื่อใช้การแปลงลาปลาซจะสามารถหาค่าของรากสมการคุณลักษณะของระบบได้ จากนั้นจะเป็นการออกแบบควบคุมระบบ โดยการวัดค่าตัวแปรต่างๆในระบบมาคูณกับอัตราขยายเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมได้สองวิธี คือ วิธีการควบคุมแบบกำหนดรากสมการคุณลักษณะของระบบวงจรมัด ทำได้โดยการหาเมทริกทดสอบคุณสมบัตินี้ คือคุณสมบัตินี้ของการประมาณค่าได้และคุณสมบัตินี้ของการควบคุมได้ เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายวิธีที่สองคือ วิธีการควบคุมแบบการหาอัตราขยายของจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้สมการของ Linear quadratic ในรูปของสมการ Riccati มาประยุกต์ เพื่อให้ผลรวมของค่ากำลังสองของตัวแปรและสัญญาณควบคุมในช่วงเวลาที่ทำการควบคุมมีค่าน้อยที่สุด และไม่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ส่วนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งและมีความสัมพันธ์กับการควบคุมทั้งสองวิธีนี้ คือ วิธีการประมาณค่าตัวแปร (Observer) เนื่องจากค่าของตัวแปรบางตัวไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง ได้แก่ ความเร็วของตัวรถและความเร็วเชิงมุมของเพนดูลัม

โดยใช้พื้นฐานการศึกษาการทำงานของชุดทดลองอินเวอร์ทเพนดูลัมของ อาจารย์พงษ์เทพ วิศิษฐ์ดดา ศึกษาหาข้อบกพร่องของโครงสร้างทางกล และโปรแกรม ที่เป็นข้อจำกัดของการทดลองควบคุมระบบรวมทั้งศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบเพื่อออกแบบและสร้างระบบขึ้นใหม่ โดยให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง เหมาะสมกับการทดลองทำการควบคุมในลักษณะต่างๆ

พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในระบบควบคุม ให้กระชับและมีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถพัฒนาต่อได้ง่าย โดยใช้โปรแกรมภาษาซีในการเขียนโปรแกรมหลัก และใช้โปรแกรมภาษาระดับต่ำ (Assembly language) ในการเขียนโปรแกรมส่วน On line เพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานในช่วงเวลาที่ทำการควบคุมระบบ เพิ่มเติมซอฟต์แวร์ตรวจสอบความพร้อมในการทำงานของชุดอินเทอร์เฟส แล้วทดลองควบคุมระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใหม่ เนื่องจากในการใช้ตัวควบคุมดิจิทัล จึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัตินี้ของตัวควบคุม และผลงานการเชื่อมต่อตัวควบคุมกับตัวให้แรงกระทำ (มอเตอร์ และชุดขับเคลื่อน) เพื่อจัดสถานะของตัวควบคุมอนาลอกมากที่สุด จากนั้นจึงทำการทดลองควบคุมระบบ เพื่อดูผลตอบสนองการควบคุมโดยใช้วิธีควบคุมทั้งสองวิธีตามที่กล่าวมาข้างต้น สำหรับการควบคุมโดยวิธีกำหนดรากคุณสมบัตินี้ของระบบวงปิด มีการทดลองดูผลตอบสนองของ

ระบบ โดยการเปลี่ยนรากสมการคุณลักษณะของวงจรถัด , รากสมการคุณลักษณะของชุดประมาณค่าตัวแปร , Sampling period และทดลองให้แรงภายนอกมาทำการรบกวนต่อระบบ (Disturbance)

สำหรับการควบคุมโดยวิธีการหาอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้สมการของ Linear quadratic มีการคำนวณหาค่า และทดลองเปลี่ยน Weighting matrix ซึ่งจะมีผลต่อค่าอัตราขยายของตัวควบคุม เพื่อดูผลตอบสนองของระบบและทำการทดลองเปลี่ยนรากสมการคุณลักษณะของชุดประมาณค่าตัวแปร , Sampling period รวมทั้งการทดลองรบกวนระบบโดยให้แรงกระทำจากภายนอก เช่นเดียวกับวิธีการกำหนดรากคุณสมบัติของระบบวงปิด

Chin E. Lin และ Yim-Ram Shen (ค.ศ.1992) ได้ออกแบบระบบควบคุมแบบผสมระหว่างระบบพีซีซีลอจิกคอนโทรลเลอร์ กับ Linear state variable โดยใช้ระบบพีซีซีลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมให้เพนดูลัมซึ่งห้อยตอกอยู่ตามธรรมชาติ ให้มาอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับแนวระนาบ จากนั้นใช้ระบบ Linear state variable ควบคุมเลี้ยงเพนดูลัมให้ตั้งฉากอยู่โดยไม่ตกลงมา

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม
- 1.2.2 ศึกษา, สร้าง และวิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ของระบบ
- 1.2.3 หาขอบเขตของตัวแปรที่มีผลต่อการทรงตัว
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 หาสมการไดนามิกส์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม
- 1.3.2 ทำการจำลองการตอบสนองของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม
- 1.3.3 ทำการทดสอบควบคุมการทรงตัวของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยใช้ชุดดีซีลีเนียร์ไดฟ์ ซึ่งมีความยาว 75 เซนติเมตร
- 1.3.4 ออกแบบชุดควบคุมโดยใช้ PID-Controller

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แบบจำลองลูกตุ้มผกผันซึ่งสามารถนำไปใช้ทดสอบกับตัวควบคุมแบบต่างๆ
 - 1.4.2 ได้ศึกษาถึงทฤษฎีและเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมของลูกตุ้มผกผันซึ่งสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง
 - 1.4.3 สามารถนำความรู้ในสาขาวิชาต่างๆมาประยุกต์ใช้ในการศึกษางานวิศวกรรมได้ เช่น ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และการควบคุม
 - 1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ ไปประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการต่างๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันและเป็นพื้นฐานของการควบคุมระบบอื่นๆ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

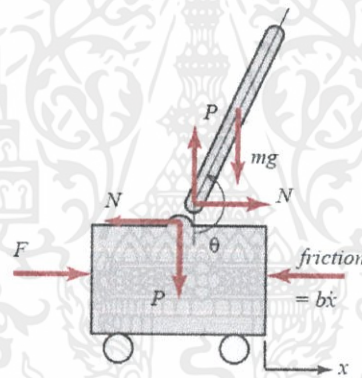
บทที่ 2

ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์เรื่องลูกตุ้มผกผันได้จากการศึกษาค้นคว้าและนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้ระบบควบคุมที่ต้องการซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎี Inverted Pendulum
- 2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2.3 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง
- 2.4 ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์
- 2.5 ระบบควบคุม PID
- 2.6 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน

2.1 ทฤษฎี Inverted Pendulum



ภาพที่ 2.1 แสดง Free-Body Diagram ของ Inverted Pendulum

ผลรวมของแรงใน free-body diagram ของ cart ในแนวแกน x จะได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (2.1.1)$$

แต่การรวมแรงในแนวแกน y ไม่ได้ใช้ในการหา mathematics model

ผลรวมของแรงใน free-body diagram ของ Pendulum ในแนวแกน x จะได้แรงปฏิกิริยาดังนี้

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta \quad (2.1.2)$$

แทนสมการ (2) ในสมการ (1) จะได้

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (2.1.3)$$

เพื่อให้ได้สมการการเคลื่อนที่สมการที่สอง ของสมการการเคลื่อนที่ของระบบ

$$P\sin\theta + N\cos\theta - mg\sin\theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x}\cos\theta \quad (2.1.4)$$

เอกสารนี้ตัดตัวแปร P และ N ในสมการข้างต้น จะได้ ผลรวมโมเมนต์ของ centroid ของ Pendulum ดังนี้

$$-Pl\sin\theta - Nl\cos\theta = I\ddot{\theta} \quad (2.1.5)$$

รวมสมการ (4) และ (5) จะได้

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \quad (2.1.6)$$

จากการคำนวณ เราสมมติให้ $\theta = \pi + \phi$ เพราะฉะนั้น

$$\cos\theta = \cos(\pi + \phi) \approx -1 \quad (2.1.7)$$

$$\sin\theta = \sin(\pi + \phi) \approx -\phi \quad (2.1.8)$$

$$\dot{\theta}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0 \quad (2.1.9)$$

จะได้สมการ

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} + mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (2.1.10)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\phi} = u \quad (2.1.11)$$

เพื่อที่จะได้ Transfer Function ของระบบสมการเชิงเส้น เราต้อง Take Laplace ของสมการระบบ สมมติเงื่อนไขเริ่มต้นเป็น 0 ผลของ Laplace Transforms จะได้ดังนี้

$$(I + ml^2)\phi(s)s^2 + mgl\phi(s) = mlX(s)s^2 \quad (2.1.12)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\phi(s)s^2 = U(s) \quad (2.1.13)$$

Transfer Function ของความสัมพันธ์ระหว่าง input และ output เดียว เพื่อที่จะหา Transfer Function ของ output $\phi(s)$ และ input $U(s)$ เราต้องกำจัด $X(s)$ จากสมการข้างต้น จึงได้สมการของ $X(s)$

$$X(s) = \left[\frac{I+ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \phi(s) \quad (2.1.14)$$

หลังจากนั้นนำไปแทนค่าในสมการที่สอง จะได้

$$(M + m) \left[\frac{I+ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \phi(s)s^2 + b \left[\frac{I+ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \phi(s)s^2 - ml\phi(s)s^2 = U(s) \quad (2.1.15)$$

จัดรูปของ Transfer Function ได้ดังนี้

$$\frac{\phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s^2}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgls}{q}} \quad (2.1.16)$$

โดยที่

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2] \quad (2.1.17)$$

Transfer Function ของตำแหน่ง Rod $\phi(s)$ ซึ่งคือ Output สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{pend}(s) = \frac{\phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s^2}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgls}{q}} \left[\frac{\text{rad}}{\text{N}} \right] \quad (2.1.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกให้แก่นักศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Transfer Function ที่สองของตำแหน่ง Cart $X(s)$ ซึ่งคือ Output สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{\text{cart}}(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{(I+ml^2)s^2 - gml}{q}}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgls}{q}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right] \quad (2.1.19)$$

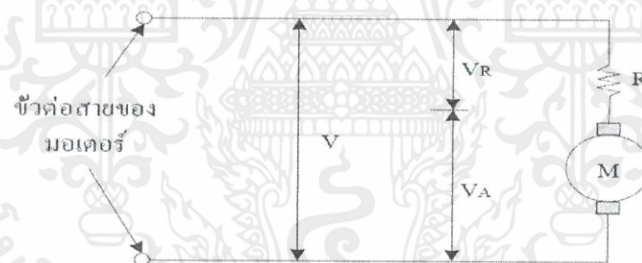
2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กซึ่งมีสัดส่วนของแรงขึ้นกับกระแสของสนามแม่เหล็ก โดยแรงจะเกิดขึ้นเป็นมุมฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก ขณะที่ทิศทางของแรงกลับตรงกันข้ามกัน ถ้าหากกระแสของสนามแม่เหล็กไหลย้อนกลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและสนามแม่เหล็กเป็นผลทำให้ทิศทางของแรงเปลี่ยนไป ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มอเตอร์กระแสตรงกลับทิศทางหมุนได้

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรซึ่งจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็ก หรือ เหล็กกล้า โดยปกติส่วนนี้จะยึดอยู่กับที่ และขดลวดเหนี่ยวนำจะพันอยู่กับส่วนที่เป็นแกนหมุนของมอเตอร์

2.2.1 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง

ในการอธิบายคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงให้ละเอียดนั้น ต้องพิจารณาแรงดันที่ป้อนและความต้านทานของโรเตอร์ด้วย วงจรภายในของมอเตอร์เขียนได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 แสดงวงจรภายในของมอเตอร์กระแสตรง

โดยสมมติให้หุ่นโรเตอร์ไม่มีความต้านทานอยู่เลย อนุกรมกับความต้านทานซึ่งในที่นี้ก็คือความต้านทานของขดลวดนั่นเอง แรงดันที่ขั้วต่อสายของมอเตอร์ก็คือผลบวกระหว่างแรงดันที่หุ่นโรเตอร์ (V_A) และ แรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวด (V_R)

แรงดัน V_A ถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (BACK EMF) ซึ่งเกิดขึ้นใน โรเตอร์ขณะที่หมุน แรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก ซึ่งสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และ แปรผันตรงกับความเร็วในการหมุน ผลบวกของแรงดันที่หุ่นโรเตอร์ (V_A) และแรงดันตกคร่อมขดลวด (V_R) ต้องเท่ากับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (V)

V คือ แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_A คือ ผลบวกของแรงดันที่หุ่นโรเตอร์

V_R คือ แรงดันตกคร่อมขดลวด

$$V = V_A + V_R \quad (V) \quad (2.2.1)$$

เมื่อพิจารณาตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่ง ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น $V_A = 0$, $V_R = V$ กระแสที่ไหลในมอเตอร์หาได้จาก

$$I = V_R/R \quad (A) \quad (2.2.2)$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีความเร็ว และ V_A เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเร็ว V_R ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง V_A จึงทำให้ค่า V จะเริ่มลดลงกระแส I ก็เริ่มลดลงเช่นกัน ขณะที่มอเตอร์ยังมีความเร็วอยู่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้น แรงบิดจะลดลงจนกว่าจะถึงจุด ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์รับภาระโหลดได้สมดุลพอดี ขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลด และ หมุนอย่างอิสระจะมีเพียงค่าความฝืดของแบร็ง และแรงต้านอากาศทำให้ V_A เกือบเท่ากับค่า V

2.2.2 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์ที่ใช้ร่วมกับดีซีแอมพลิไฟ์ทั้งในระบบการบังคับตำแหน่งและการบังคับความเร็วมักจะได้รับการประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบสร้างกำลังงานในระบบการนำร่องและระบบบังคับต่างๆ เนื่องจากวิทยาการเกี่ยวกับสารแม่เหล็กและการขยายตัวด้วยโซลิดสเตต ทำให้ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ใช้เป็นส่วนประกอบการขับเคลื่อนในระบบการบังคับแบบลูปปิดต่างๆ มากขึ้น การออกแบบและการชดเชยระบบดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม จะต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบทั้งหมดในระบบดังภาพที่ 2.2

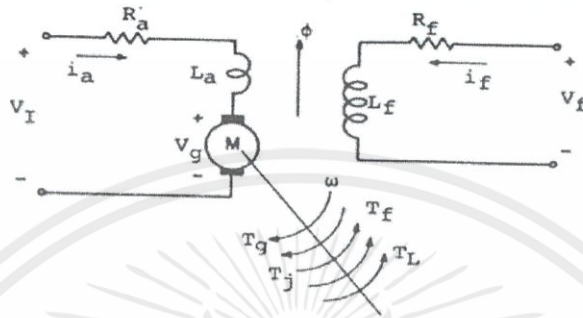


ภาพที่ 2.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของโมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรมแมคคานิคอลและสมการควบคุมความเร็ว

ส่วนสำคัญของดีซีมอเตอร์แบบฟیلด์แยกกระตุ้นมีโมเดลดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงโมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟیلด์แยกกระตุ้น

R_a : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

L_a : อินдукแตนซ์ของอาร์เมเจอร์

V_g : โวลต์เตตก่าเนิดในอาร์เมเจอร์ (โวลต์เตทย้อนกลับ)

R_f : ความต้านทานของฟیلด์

L_f : อินдукแตนซ์ของฟیلด์

θ : ช่องว่างอากาศของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก

ω : ความเร็วของเพลอาร์เมเจอร์

T_g : แรงบิดที่พัฒนาขึ้นในมอเตอร์

T_f : แรงบิดเสียดทานของมอเตอร์

T_j : แรงเฉื่อยของมอเตอร์

T_L : แรงบิดโหลดบนเพลของมอเตอร์ขั้นแรกเราจะหาสมการพื้นฐานโมเดลของ

ดีซีมอเตอร์ได้จากลูปของอาร์เมเจอร์

$$V_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_g(t) \quad (2.2.3)$$

เทอมโวลต์เตท $V_g(t)$ ในสมการ (2-3) คือโวลต์เตทย้อนกลับของมอเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเส้นลวดตัวนำของอาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นในกระแสของฟیلด์ (i_f) ตามกฎของฟาราเดย์ลูปของเส้นลวดตัวนำหมุนในฟیلด์แม่เหล็กคงที่จะมีการเหนี่ยวนำโวลต์เตทขึ้นในขดลวดนั้น

$$V_i(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2.2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\lambda(t)$ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ลิงเคจ (linkages) ไปยังขดลวดและ t คือเวลาในการหมุนของคอมมิวเตเตอร์ของมอเตอร์ การควบคุมวงจรของแต่ละส่วนของตัวนำในโรเตอร์จะเกิดโวลต์เตตขึ้นในส่วนของตัวนำนั้นตามสมการ (2-4) เมื่อ $\frac{d\lambda(t)}{dt}$ จะเป็นสัดส่วนต่อเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและความเร็วเชิงมุม $\omega(t)$ เราจะได้ว่า

$$V_g(t) = K_e \varphi(t)\omega(t) \quad (2.2.5)$$

สมมติให้กระแสของฟิลด์มีค่าคงที่และไม่คิดถึงส่วนการเปลี่ยนแปลงในเส้นแรงฟิลด์เนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกซ์เส้นแรงฟิลด์ก็จะมีค่าคงที่ดังนั้นสมการ(2-5) ก็จะเป็น

$$V_g(t) = K_e \omega(t) \quad (2.2.6)$$

เมื่อเราสมมติให้เส้นแรงของฟิลด์มีค่าคงที่ แรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นส่งผลแก่โรเตอร์ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสของอาร์เมเจอร์

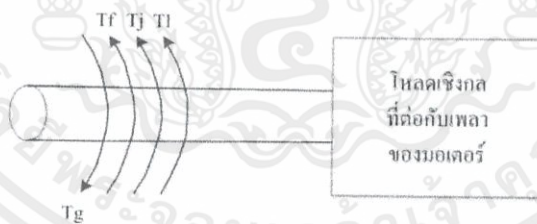
$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (2.2.7)$$

เมื่อ K_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์คือผลคูณของแรงบิดที่เกิดขึ้นและความเร็วเชิงมุม

$$P_g(t) = T_g(t)\omega(t) \quad (2.2.8)$$

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ทั้งหมดนี้จะจ่ายไปยังโหลดที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์แต่กำลังงานนี้บางส่วนจะสูญเสียไปในมอเตอร์ การสูญเสียจากแรงเสียดทานหมายถึงความหน่วงเนื่องจากลมที่มีต่อโรเตอร์ แรงเสียดทานตัวรองรับโรเตอร์กระแสที่ไหลวนในเหล็กของโรเตอร์และฮีสเตอร์ซิส โดยแรงบิดต่างๆแสดงดังรูปภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงถึงแรงบิดต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์

$T_g(t)$: แรงบิดของมอเตอร์

$T_j(t)$: แรงบิดที่ต้องชนะการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน

$T_l(t)$: แรงบิดเพื่อใช้เพิ่มอัตราเร่งแก่ความเฉื่อยของโหลด

$T_L(t)$: แรงบิดโหลด

ในระยะเวลาใดๆก็ตามแรงบิดของมอเตอร์จะต้องเท่ากับและมีทิศทางตรงข้ามกับผลรวมของแรงบิด $T_j(t)$ $T_l(t)$ และ $T_L(t)$ ดังนั้น

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2.2.9)$$

เมื่อ J คือผลรวมของโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่ที่เพลลาของมอเตอร์

ผลรวมของแรงบิดเสียดทานที่ประกอบกันขึ้นที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เรียกว่าส่วนประกอบของวิสกอสฟริกชันและมักจะมีอยู่ในเทอมที่แยกออกจากฟริกชันอื่นๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2.2.10)$$

เมื่อ B คือสัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชันของมอเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์ $T_f(t)$ คือผลรวมของฟริกชันของโหลดและมอเตอร์ทั้งหมด มีแรงต้านของลมและการสูญเสียกำลังในเหล็กของเพลลามอเตอร์ยกเว้นวิสกอสฟริกชัน

สมการ (2-3) (2-6) (2-7) และ (2-10) เป็นชุดสมการพื้นฐานของดีซีมอเตอร์โมเดลและสมการเหล่านี้เราสามารถจะหาทรานส์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ได้โดยใส่ลาปลาซทรานส์ฟอร์มทั้งสองข้างของชุดสมการพื้นฐานได้เป็น

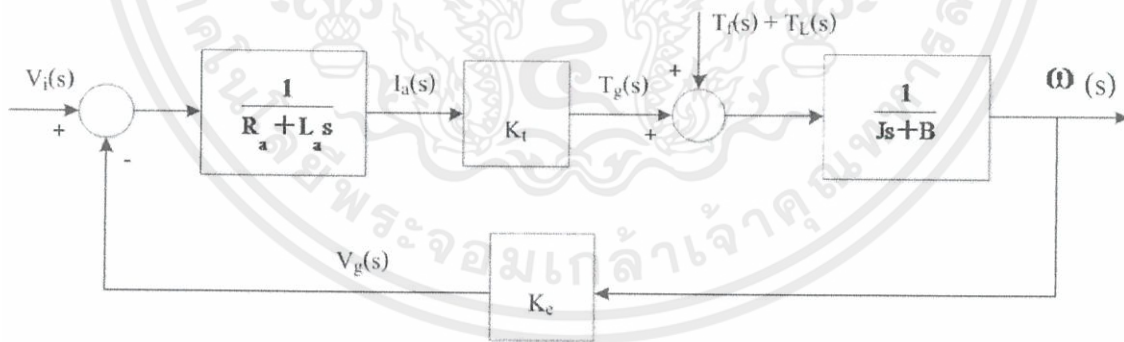
$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a) I_a(s) \quad (2.2.11)$$

$$V_g(s) = K_e \omega(s) \quad (2.2.12)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (2.2.13)$$

$$T_g(s) - T_f(s) - T_L(s) = (B + sJ)\omega(s) \quad (2.2.14)$$

สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงสมการพื้นฐานเหล่านี้ได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล

สมมติว่าโวลต์เตดที่ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์มีค่าคงที่ดังนั้นมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่คือทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งด้วยโหลดที่คงที่ที่กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นโดยโรเตอร์จะหาได้จากสมการ(2.8)จะ

$$P_g = T_g \omega = K_t I_a \omega \quad (2.2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทุกทอมในสมการสุดท้ายมีค่าคงที่เนื่องจากมอเตอร์ทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งกำลังไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนโดยอาร์เมเจอร์ต้องเท่ากับ

$$P = V_g I_a = K_e \omega I_a \quad (2.2.16)$$

ดังนั้นจะได้ว่ากำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นต้องเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในโรเตอร์คือสรุปได้ว่า $K_e = K_t$ ทราเนเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์

บล็อกไดอะแกรมของภาพที่ 2.7 แสดงถึงระบบการควบคุม และมีเอาต์พุตเป็นความเร็วเชิงมุม $\omega(s)$ และการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม $\omega(s)$ จากภาพที่ 2-24 ความเร็วเอาต์พุตของระบบเขียนได้เป็น

$$\omega(s) = G_1(s)V_i(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_L(s)] \quad (2.2.17)$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \left. \frac{\omega(s)}{V_i(s)} \right|_{T_f(s) + T_L(s) = 0} \quad (2.2.18)$$

$$G_2(s) = \left. \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \right|_{V_i(s) = 0} \quad (2.2.19)$$

$G_1(s)$ คือทราเนเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างโวลต์เดทและความเร็ว

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(j_s + B) + K_t K_e} \quad (2.2.20)$$

$$= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1}$$

เมื่อ

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e} \quad (2.2.21)$$

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_t K_e} \quad (2.2.22)$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e} \quad (2.2.23)$$

สมการ (2-18) เป็นโวลต์เดททราเนเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ในเมื่อสมมติว่า T_f และ T_L มีค่าเป็นศูนย์ สมการ (2-18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B (1 + \tau_e s) (1 + \tau_m s) + K_t K_e} \quad (2.2.24)$$

เมื่อ

$$\tau_m = \frac{L_a}{R_a} = \text{ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้า}$$

$$\tau_m = \frac{J}{B} = \text{ไทม์คอนสแตนต์ทางเชิงกล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับบริการเชิงนวัตกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีวัตถุประสงค์เป็นอย่างอื่น และต้องขอขออนุญาตก่อนนำไปใช้

$$G_v(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{R_a(Js+B) + K_tK_e} = \frac{K_m}{\tau s+1} \quad (2.2.25)$$

$$\tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e} \quad (2.2.26)$$

ในสมการ 2.19 ค่าคงที่ K_m อาจเรียกได้ว่าเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันแรงบิดโหลด $G_2(s)$ หาได้เป็น

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s)+T_L(s)} = \frac{\frac{1}{Js+B}}{1+\frac{K_t K_e}{(Js+B)(L_a+R_a)}} = \frac{\frac{R_a K_m}{K_t} \left[\frac{L_a s+1}{R_a} \right]}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (2.2.27)$$

ซึ่งถ้าอินตักแทนซ์ของอาร์เมเจอร์ไม่น่ามาคิด จะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$G_L(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s)+T_L(s)} = \frac{\frac{R_a K_m}{K_t}}{\tau s+1} \quad (2.2.28)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.15 เมื่อให้ค่าของ T_f และ T_L มีค่าเป็นศูนย์จะทำให้ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันมีค่าดังนี้

$$\omega(s) = G_v(s)V_i(s) = \frac{K_m}{\tau s+1} (s) \quad (2.2.29)$$

และจากภาพที่ 2-10 ตำแหน่งเอาต์พุตของระบบเป็นดังนี้

โมเดลคณิตศาสตร์ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ จากทรานเฟอร์ฟังก์ชันในหัวข้อที่ โมเดล 2.3.2 คณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์ซึ่งได้โมเดลของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในรูปของสมการอันดับหนึ่งเป็นดังนี้ คือ

$$\omega(s) = G_v(s)v_i(s) = \frac{K_m}{\tau s+1} \quad (2.2.30)$$

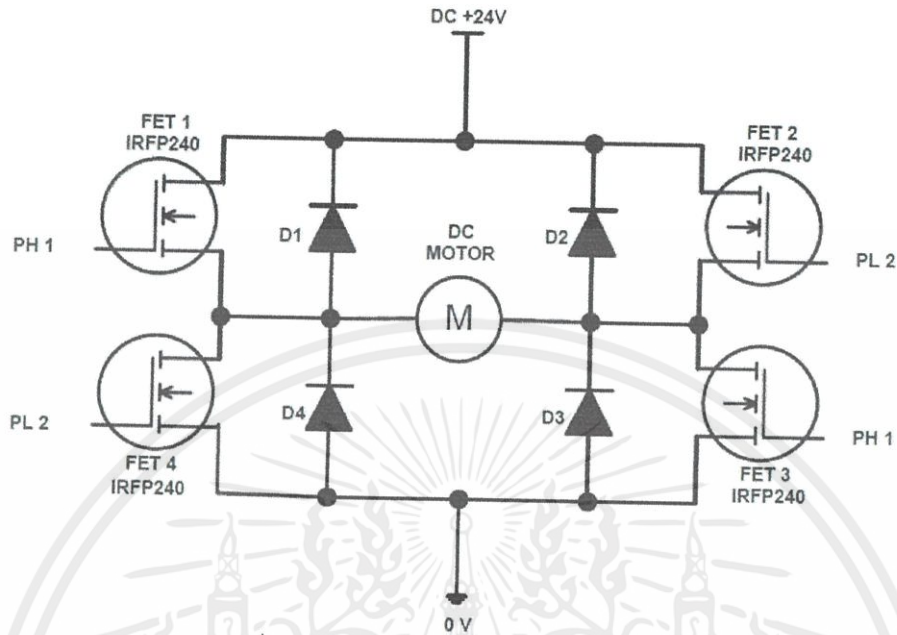
จากสมการข้างต้นดังกล่าวนั้นจะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (output) และ ค่าแรงดันที่ป้อน (input)

2.3 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

วงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge หรือแบบฟูลบริดจ์ชนิดไบโพล่าประกอบด้วยมอสเฟส 4 ตัวใช้ แหล่งจ่ายไฟตรงเพียงตัวเดียว ภาคเอาต์พุตมีข้อดีคือ ง่ายต่อการควบคุมและการป้องกันแรงดันย้อนกลับเนื่องจากการแบ่งส่วนการทำงานระหว่างมอสเฟส อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะให้วงจร ภาคเอาต์พุตแบบนี้ทำงานเป็นลิเนียร์หากไม่มีการป้อนกลับ(Feedback) การป้องกันกระแส และ แรงดันย้อนกลับจากมอเตอร์เป็นไปได้ยาก เนื่องจากมอเตอร์อยู่ในสภาวะลอยตัวในวงจรจึงมีการ ต่อไดโอดเพื่อป้องกันกระแสและแรงดันดังกล่าวย้อนกลับมายังมอสเฟสอีกด้วย

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน นโมณัฐาด ให้น่าไปใช้ประโยชน์ เช่น การค้า

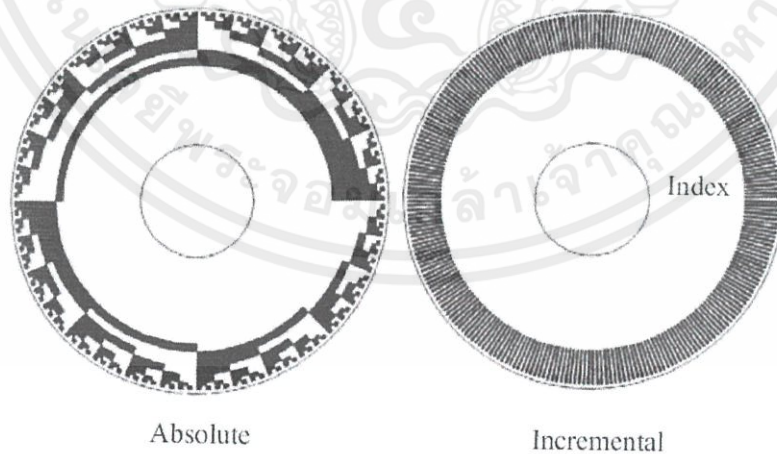
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงวงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge

2.4 ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์

เอ็นโค้ดเดอร์สามารถออกแบบที่ให้สัญญาณพัลส์คอมมิวเตชันกับสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูงซึ่งถูกใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่สูง ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์จะใช้เมื่อต้องการสัญญาณมากกว่าพัลส์ คอมมิวเตชัน ประกอบด้วยชุดของคูโฟโตทรานซิสเตอร์ กับ ชุดแหล่งกำเนิดแสงถูกใช้ ร่วมกับแผ่นแก้วหรือวัสดุที่ใช้สำหรับทำแผ่นเอ็นโค้ดเดอร์มีลักษณะแบนเป็นช่องๆ จำนวนช่องจะถูกกำหนด โดยความถี่และรูปคลื่นของพัลส์เทรนที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์



ภาพที่ 2.8 แสดงแผ่นออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์ทั้ง 2 แบบ

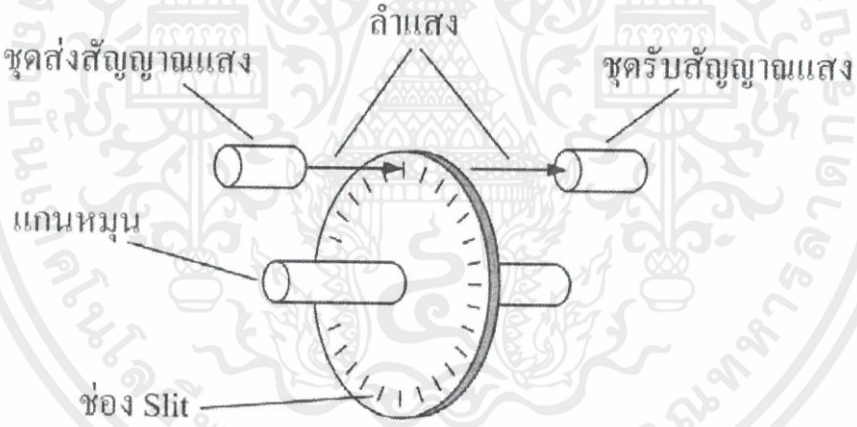
เอกสารนี้
ภาพที่ 2.8 แสดงแผ่นเอ็นโค้ดเดอร์ทั้ง 2 แบบปกติการผลิต Incremental เอ็นโค้ดเดอร์ในเชิงการค้าที่ใช้กันอยู่มีร่องอยู่สองชุดคือร่อง A และ B ชุดแรกเป็นรูปเหลี่ยมเท่าๆกันและจะทึบแสงสลับกันกับ โปร่งแสงช่องเว้น

ช่องและอีกชุดจะให้สัญญาณหนึ่งช่องต่อรอบแสดงสัญญาณพัลส์ ที่ได้อ้างอิงตำแหน่งของโรเตอร์ยังมีแผ่นเอ็นโค้ดเดอร์แบบพิเศษ ที่ยุ่งยากไปกว่านั้นคือ Absolute เอ็นโค้ดเดอร์ที่สามารถให้สัญญาณบอกตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ได้อย่างสมบูรณ์และมีความแม่นยำสูง เอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการจับมอเตอร์แบบนี้ในหนึ่งรอบจะมีจำนวน 1,000 ช่อง

ออปติคอลลเอ็นโค้ดเดอร์จะติดตั้งอยู่บนมอเตอร์ด้วยวิธีเดียวกับรีโซฟเวอร์และมีหลายรุ่นแตกต่างกันออกไปซึ่งภายในตัวไม่มีแปรง การผลิตพัลส์สามารถทำได้จาก แผ่นออปติคอลลเอ็นโค้ดเดอร์โดยตรงและสามารถนำไปใช้เชื่อมต่อกับวงจรดิจิทัลได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติยัง

มีข้อจำกัดคือเอ็นโค้ดเดอร์ไม่สามารถใช้ในที่มีอุณหภูมิสูงได้เหมือนกับรีโซฟเวอร์และมีอายุใช้งานสั้น ราคาของเอ็นโค้ดเดอร์จึงถูกกว่า จากภาพที่ 2.8 ในการใช้งาน Increment เอ็นโค้ดเดอร์จะต้องหาตำแหน่งเริ่มต้นเพื่อที่จะเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ทุกครั้ง ถ้าต้องการหลีกเลี่ยงการหาตำแหน่งที่เริ่มต้น สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนมาใช้ Absolute เอ็นโค้ดเดอร์แต่จะมีราคาแพงขึ้น

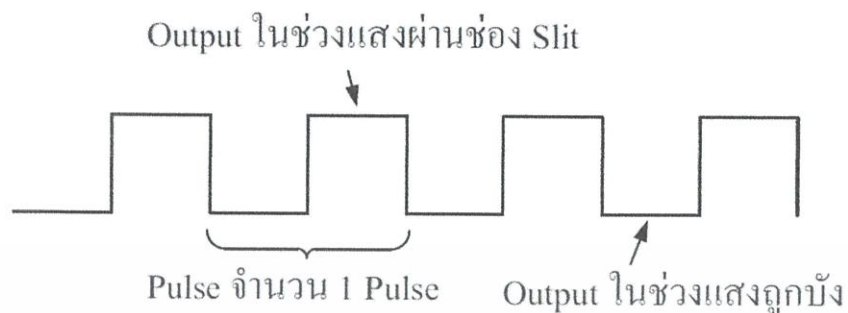
โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีแกนอยู่ตรงกลาง และ ที่แผ่นกลม จะมีช่องเล็กๆที่แสงสามารถส่องผ่านได้ เป็นจำนวนมากเราเรียกช่องนี้ว่า ช่องสลิต (Slit) ซึ่งที่ด้านหนึ่งของ แผ่นกลมนี้จะมีตัวส่งแสงอินฟราเรด (Infrared) ไปยังตัวรับสัญญาณแสงอินฟราเรดซึ่งจะอยู่ในด้านตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

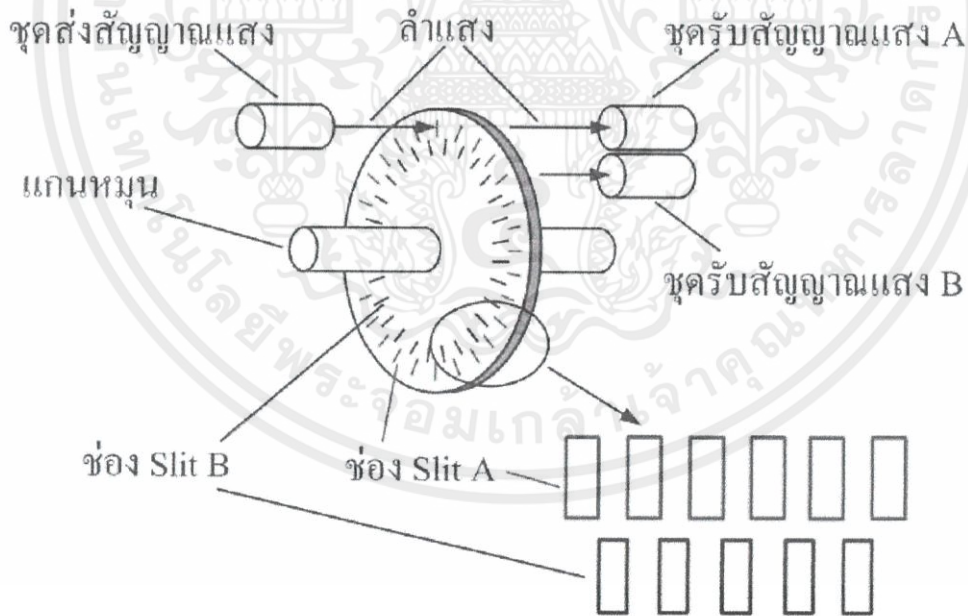
เมื่อหมุนแกนหมุนทำให้แผ่นกลมหมุนไปตัดลำแสงอินฟราเรดดังนั้นชุดรับแสงอินฟราเรดจึงมีแสงมากระทบเป็นช่วงๆ เป็นพัลส์ (Pulse) ตามจังหวะที่แสงผ่านช่องสลิตจึงทำให้ สัญญาณเอาต์พุตของ ชุดรับแสงอินฟราเรดมีลักษณะเป็นพัลส์ ดังภาพที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 แสดงการสร้างสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

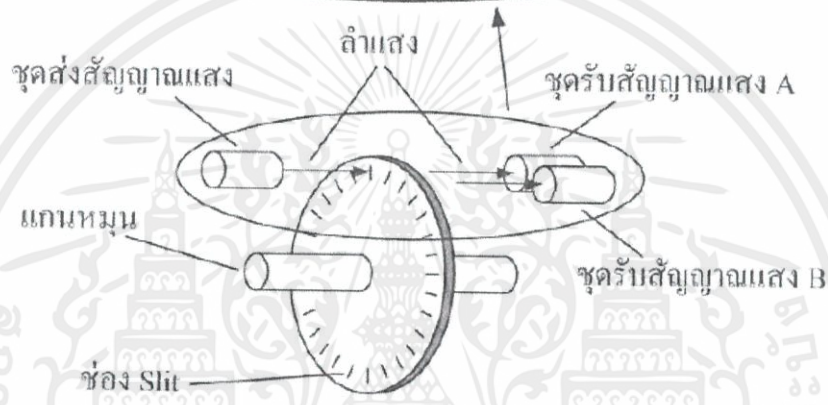
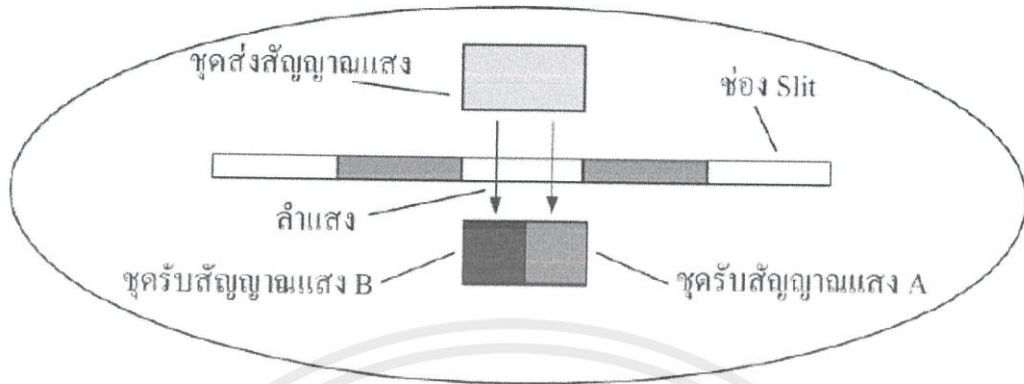
จำนวนสัญญาณพัลส์ที่ได้ออกมานี้จะเป็นตัวที่ชี้บ่งว่ามอเตอร์หมุนไปกี่องศา หรือกี่รอบ ซึ่งเราสามารถคำนวณได้จากสูตร จำนวนรอบที่มอเตอร์หมุนไป = จำนวนสัญญาณพัลส์ค่าความละเอียดของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) โดยที่ค่าความละเอียดของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) นั้นนิยมใช้หน่วยเป็นพัลส์ต่อรอบ (Pulse/Round : ppr) เช่น 1000 พัลส์ต่อรอบ (ppr) ก็หมายความว่าเมื่อมอเตอร์หมุนไป 1 รอบจะมีสัญญาณพัลส์ออกมา 1000 พัลส์เป็นต้นส่วนในเรื่องที่ว่าเราจะทราบได้อย่างไรว่ามอเตอร์หมุนไปทิศทางใดนั้น ส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีสร้างช่องสลิตเป็น 2 ชุดเหลื่อมกัน 90 องศา ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงสัญญาณพัลส์ของโรตารี (Rotary) แบบสองเฟส

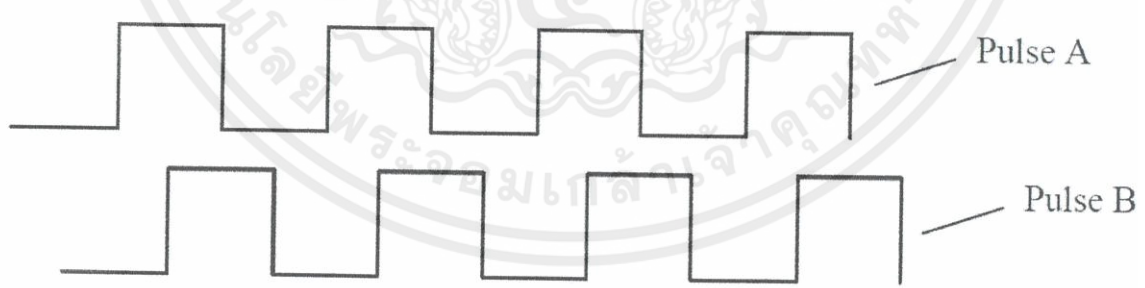
หรืออาจจะใช้ช่องสลิตเพียง 1 ชุดแต่ต้องมีการจัดวางชุดรับสัญญาณแสงดังรูปข้างล่าง แต่ข้อสำคัญคือจะต้องมีเฟสต่างกัน 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



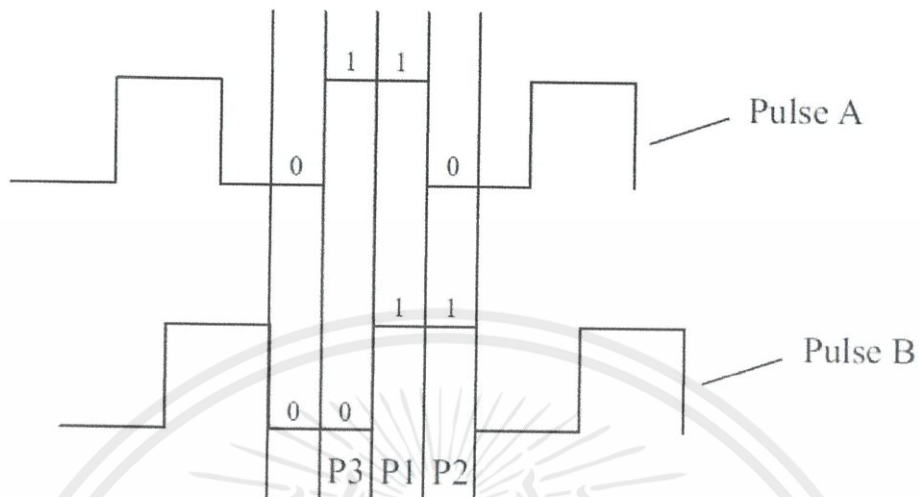
ภาพที่ 2.12 แสดงการตรวจเช็คสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์จึงมี 2 ชุด คือ A และ B โดยที่สัญญาณพัลส์จาก A และ B ก็จะไม่ต่างเฟสกัน 90 องศา กล่าวได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ 2 บิต คือ หนึ่งบิตมาจาก A และ อีกหนึ่งบิตมาจาก B ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ลักษณะสัญญาณพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ทั้งสองเฟส

ถ้าเราให้สัญญาณพัลส์ในช่วง High มีค่าเป็น "1" และสัญญาณพัลส์ในช่วง low มีค่าเป็น "0" เราสามารถใช้ค่าดังกล่าวมาคำนวณหาทิศทางที่มอเตอร์หมุนได้ด้วยใช้วิธีการทางดิจิทัลคือการนำค่าที่อ่านได้มาทำการเอ็กซ์คลูซีฟออร์ (Exclusive OR; XOR) กัน โดยการนำบิตทางขวาของค่าเก่ามา XOR กับบิตทางซ้ายของค่าใหม่ทีอ่านได้ตามตัวอย่างข้างล่าง



ภาพที่ 2.14 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์

สมมุติในตอนแรกมอเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 เพราะฉะนั้นค่าของตัวเลขไบนารี(binary) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์จะมีค่าเป็น 11 ถ้ามอเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่ง P3 จะทำให้ค่าของตัวเลขไบนารีที่อ่านได้ จากเซนเซอร์จะมีค่าเป็น 10 ดังนั้นถ้าเรานำเอาค่าทางขวาจากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา (10) ซึ่งก็คือ 1 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นค่า 0 จึงเป็นค่าที่บอกว่ามอเตอร์หมุนไปทางขวา ในทางกลับกันถ้าในตอนแรกมอเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 และต่อมามอเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่ง P2 ถ้าเรานำเอาค่าทางขวาจากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา (01) ซึ่งก็คือ 0 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นค่า 1 จึงเป็นค่าที่บอกว่ามอเตอร์หมุนไปทางซ้ายและการ XOR ค่าต่างๆได้แสดงไว้ดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2.1 การ XOR ด้วยค่าต่างๆ

A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

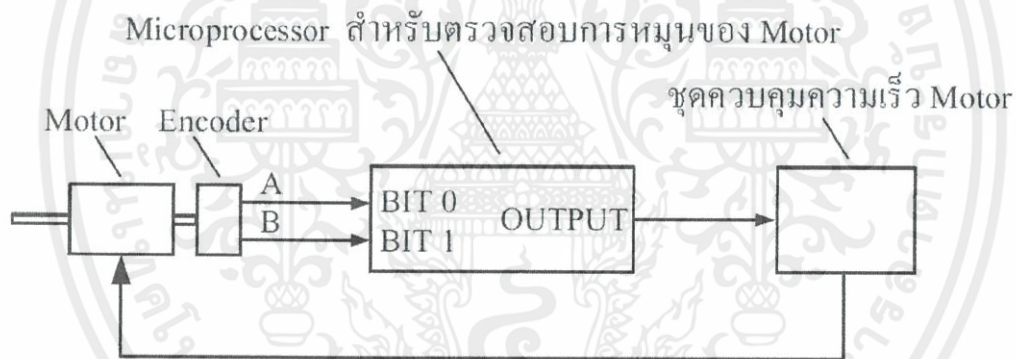
สัญญาณพัลส์ที่ได้จากโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) จะถูกนำไปเชื่อมต่อเข้ากับวงจรนับสัญญาณพัลส์หรือวงจรคำนวณเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามอเตอร์หมุนไปทิศทางใดและอยู่ที่ตำแหน่งใด ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโดยส่วนมากแล้วมอเตอร์ที่ใช้โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) แบบนี้จะมีจำนวนรอบของการหมุนที่ไม่จำกัดโดยจะหมุนไปกี่รอบก็ได้ ขึ้นอยู่กับความสามารถของวงจรนับสัญญาณพัลส์และวงจรคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราอาจจะกล่าวได้ว่าเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆ คือเป็นแบบมีค่าเอาท์พุทที่ไม่จำกัด (Incremental Encoder) และแบบที่มีค่าเอาท์พุทที่จำกัด (Absolute Encoder)

Incremental Encoder มักจะเป็นแบบโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่าขนาดของเอาท์พุทของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรนับและวงจรคำนวณ

Absolute Encoder ที่พบเห็นส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Potentiometer แต่ในบางครั้งก็อาจเป็นแบบโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) ก็ได้แต่จะมีการออกแบบลักษณะของช่องสลิตที่ต่างไปจากโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) ได้ไว้ในตอนต้นโดยอาจจะมีค่าของเอาท์พุทตั้งแต่ 4 บิตถึง 16 บิต

ในแง่ของการใช้งานแล้วมอเตอร์ที่มีเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ Incremental Encoder นั้นจะใช้งานยุ่งยากกว่ามอเตอร์ที่มีเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ Absolute Encoder เพราะเอาท์พุทของ Increment Encoder นั้นไม่สามารถเชื่อมต่อกับชุดควบคุม (Controller) ได้ทันทีโดยต้องต่อผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์และวงจรคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนก่อนถึงจะต่อเข้ากับชุดควบคุมได้แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเรามีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เช่น Arduino หรือ PIC เป็นต้น ดังนั้นเราจึงสามารถนำมาใช้แทนวงจรมัลติเพล็กซ์และวงจรคำนวณ จึงทำให้การใช้งานง่ายขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดง Block Diagram การใช้งานของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

2.5 ระบบควบคุม PID

2.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบควบคุม PID

ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยส่วนประกอบคือ Proportional, Integral และ Derivative ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบควบคุมแบบป้อนกลับตามกระบวนการในภาคอุตสาหกรรม ในการประยุกต์ใช้งานระบบควบคุม PID วิศวกรต้องทำการออกแบบระบบควบคุมนั้นคือพวกเขาต้องคำนึงถึงการทำงานของระบบในการเลือกใช้งานเป็นอันดับแรกและจากนั้นทำการปรับค่าตัวแปรต่างๆในการควบคุมเพื่อที่จะควบคุมปัญหาหรือแก้ปัญหาอย่างเหมาะสม เพื่อวัตถุประสงค์คือ ต้องการรู้คุณลักษณะการคำนวณ ดังนั้นจุดเริ่มต้นสำหรับการออกแบบจำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการประเมินสมรรถภาพของระบบควบคุม ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหัวข้อต่าง ๆ นั้น ได้สรุปอยู่ในเนื้อหา ดังนี้

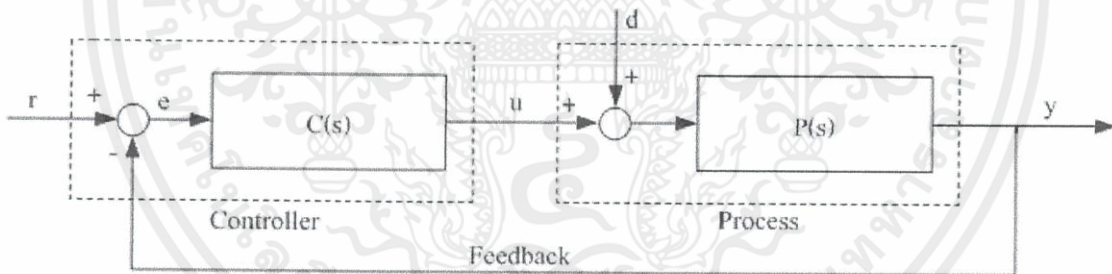
เอกสารนี้เกี่ยวกับตัวควบคุม PID เริ่มใช้งานครั้งแรกในปี 1939 และยังคงได้รับความนิยมแพร่หลายในงานควบคุมระบบต่างๆจนถึงปัจจุบัน ซึ่งได้รับการพิสูจน์การทำงานในปี 1989 ที่ญี่ปุ่น จึงแสดงให้เห็นว่าในงานควบคุมมากกว่า 90% ใน

ภาคอุตสาหกรรมมีการเลือกใช้ กับเทคโนโลยีใหม่ๆของตัวควบคุม PID PID control คือ วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุม PID เป็นเครื่องมือหลักในการควบคุม โครงสร้างพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปได้แสดงดังภาพที่ 2.16 ซึ่งใช้ภาพไดอะแกรมในการแสดง ในภาพนี้ตัวถูกควบคุม (Process) คือสิ่งที่ต้องการควบคุมจุดประสงค์ของการควบคุม คือการทำให้ตัวถูกควบคุม (Process) นั้นปรับเปลี่ยนค่า y ตามค่าของ Set Point คือ ค่า r เพื่อการบรรลุเป้าหมายตามจุดประสงค์ที่ต้องการ ตัวควบคุมการแปรผันค่า u จะทำการแปรผันตามคำสั่งของ Controller ดังเช่นตัวอย่างของกระบวนการที่คล้ายกันคือของเหลวในถังต้มที่ภายในนั้นมีของเหลวที่ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊ส

ในกระบวนการปรับค่า y คือการปรับอุณหภูมิของเหลว และการปรับค่าที่เหมาะสมของ u ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยสิ่งรบกวนจากภายนอกก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่นอกเหนือไปจากการควบคุมการปรับค่า นั้นเป็นผลจากการปรับค่าของตัวถูกควบคุม (Process) จากภาพที่ 2.16 สมมติว่ามีสิ่งรบกวนจากภายนอกเพียงสิ่งเดียวเท่านั้นที่เข้าไปรบกวนตัวปรับค่า ในบางงาน อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้วสิ่งรบกวนจากภายนอกมีรูปแบบที่แตกต่างกัน หรือสิ่งรบกวนจากภายนอกที่มากกว่านั้น ต้องนำมาพิจารณาเป็นพิเศษ

ตัวชดเชยค่าผิดพลาด (Error) หรือ e หาได้จากสมการ $e = r - y$ การชดเชยของ $C(s)$ คือผลที่ได้จากการคำนวณซึ่งเป็นตัวตัดสินใจในการปรับค่าที่เหมาะสมของ u ตามข้อมูลขาเข้า

(Input Data) ซึ่งก็คือ e ในกรณีของภาพที่ 2.16 สิ่งสุดท้ายที่จะอธิบายเกี่ยวกับภาพนั้นคือกระบวนการปรับค่า y ที่ได้จากการวัดค่าของตัวตรวจจับซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในภาพนี้ ประกอบกับความแม่นยำที่เพียงพอที่ Input ไปสู่ตัวควบคุม (Controller) สามารถพิจารณาเห็นว่าเป็นจริงเท่ากับค่า y



ภาพที่ 2.16 แสดงภาพ Block Diagram ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ก่อนหน้านี้ระบบควบคุม PID มีความถูกต้องตามองค์ประกอบของภาพที่ 2.16 ในที่ซึ่งตัวควบคุม PID ใช้ในการชดเชยค่าที่ถูกต้อง $C(s)$ ให้มีค่าเท่ากับ เมื่อใช้วิธีนี้ตัวประกอบทั้งสามส่วนของตัวควบคุม PID ทำให้เกิดผลลัพธ์ออกมาตามลักษณะตามธรรมชาติดังนี้

P คือ การปรับสัดส่วน Error ที่ช่วงเวลาชั่วขณะ (Instant t) ซึ่งก็คือ Error ปัจจุบัน

I คือ การปรับพื้นที่ของ Error ที่ช่วงเวลาชั่วขณะ (Instant t) ซึ่งก็คือการรวบรวม Error เก่า (Past Error)

D คือ การอนุพันธ์ของ Error ที่ช่วงเวลาชั่วขณะ (Instant t) ซึ่งก็คือการประมาณค่า Error ใหม่ (Future Error)

ดังนั้น ตัวควบคุม PID สามารถพิจารณาได้จากการควบคุมค่าผิดพลาด (Error) ของปัจจุบัน อดีต และอนาคตหลังจากนั้นเครื่องมือทางดิจิทัลได้ถูกเสนอใช้งานจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในโครงสร้างของระบบ

ควบคุมและได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ แต่ว่าการเปลี่ยนแปลงครั้งนั้นไม่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบสำคัญของการวิเคราะห์และการออกแบบตัวควบคุม PID

ดังนั้น เราจะพิจารณาองค์ประกอบจากภาพที่ 2.16 ไปสู่หัวข้อที่ 2.5.6 ซึ่งอธิบายถึงองค์ประกอบใหม่ ๆ สมการฟังก์ชันถ่ายโอน $C(s)$ ของระบบควบคุม PID

$$C(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D D(s) \right\} \quad (2.5.1)$$

โดยมีเงื่อนไขว่าตัวประกอบทั้งสาม ประกอบด้วย K_p , T_I และ T_D คือค่าตัวแปรทางบวกซึ่งหมายถึงสัดส่วนอัตราขยาย ช่วงเวลาปริพันธ์ และช่วงเวลาอนุพันธ์ตามลำดับ แทนตัวแปรทั้งหมดของตัวควบคุม PID ส่วน $D(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่หาได้จากสมการ

$$D(s) = \frac{s}{1 + (T_D/\gamma)s} \quad (2.5.2)$$

และเรียกว่า “ค่าประมาณอนุพันธ์” (Approximate Derivative) ซึ่งถูกใช้แทนด้วยอนุพันธ์เดี่ยว S เพราะไม่สามารถอธิบายทางกายภาพได้ในภายหลัง ในสมการที่ (2.5.2) และ γ คือค่าตัวแปรทางบวก ซึ่งหมายถึง “อัตราขยายอนุพันธ์” (Derivative Ratio) การตอบสนองของค่าประมาณอนุพันธ์นั้นใกล้เคียงกับค่าอนุพันธ์เดี่ยวโดยการเพิ่มอัตราขยายอนุพันธ์ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า อย่างไรก็ตามนั้นยังพบสัญญาณรบกวนอยู่ซึ่งมีส่วนประกอบที่เข้มข้นในย่านความถี่สูงกว่าปกติคือพบอยู่ในสัญญาณเป็นส่วนมาก และเลือกค่าจำนวนของอัตราขยายอนุพันธ์ในการตรวจจับสัญญาณรบกวน ดังนั้นตัวควบคุมจึงไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ซึ่งอนุพันธ์เดี่ยวนั้นไม่ใช่ตัวประกอบทางอุดมคติในการนำไปใช้งานจริงโดยปกติจะนำไปใช้งานเป็นค่าอัตราขยายอนุพันธ์ γ เป็นค่าคงที่ซึ่งโดยปกติสามารถเลือกประยุกต์ใช้งานได้มากกว่า 10 แบบ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ว่าในการใช้อัตราขยายอนุพันธ์ γ ในการออกแบบค่าตัวแปรสำหรับวัตถุประสงค์เช่นชดเชยค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบให้เท่ากับศูนย์

ในการใช้งานตัวควบคุม PID วิศวกรจำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุม ในทางเดียวกันมักจะคำนึงถึงตัวแปรต่างๆในการทำงานเป็นอันดับแรกและทำการปรับแต่งค่าตัวแปร ดังนั้นจะทำการควบคุมและแก้ปัญหาอย่างเหมาะสม ในที่สุดสิ่งที่ต้องการคือคุณลักษณะของกระบวนการ โดยพื้นฐานของการออกแบบจำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุม ในเรื่องนี้จะกล่าวต่อในหัวข้อที่ 2.5.4 (ดูในตัวประกอบของระบบควบคุม)

2.5.2 แบบจำลองกระบวนการทำงาน

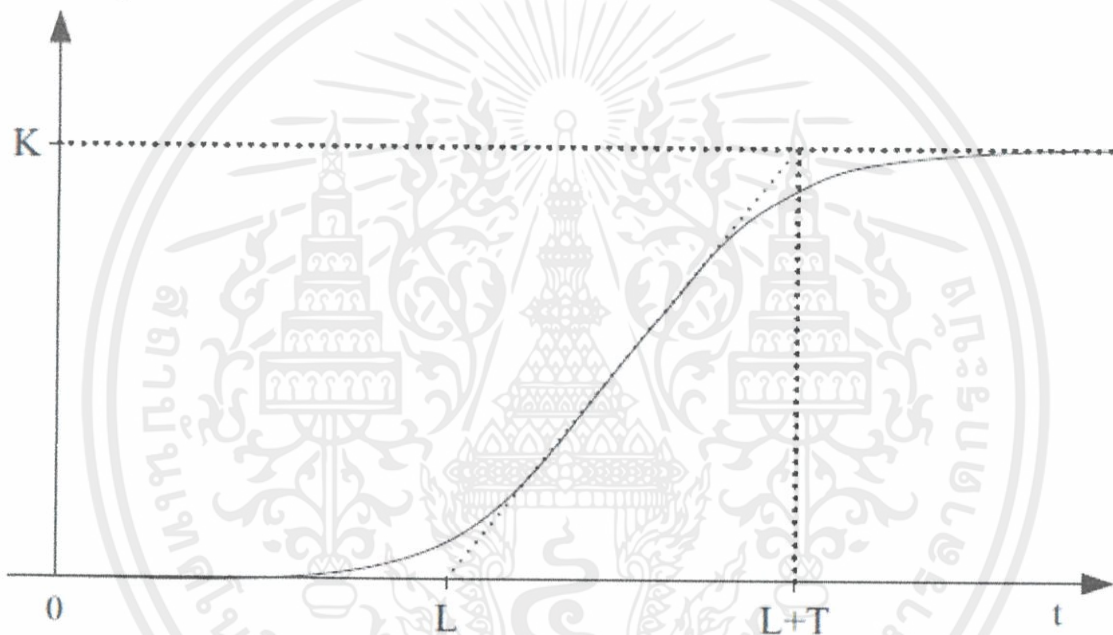
โดยกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน Unit step $f_{\text{step}}(t)$ ได้แก่

$$f_{\text{step1}}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2.5.3)$$

การตอบสนอง $y_{u,\text{step}}(t)$ ของตัวแปรกระบวนการปรับค่าไปสู่การควบคุมการปรับค่าของ Unit step โดยเพิ่มเข้าไปในระบบโดยตรงที่สถานะชั่วขณะหนึ่งเรียกว่า “Step Response” หรือ “Indicial Response” ของระบบ ในรูปของ “Reaction Curve” ซึ่งถูกนำไปใช้เช่นกัน โดยพื้นฐานในความหมายเดียวกันนั้นแต่สังเกตตามภาพ ถ้า Step Response เข้าสู่ขอบเขตของค่า K เมื่อ $t \rightarrow \infty$ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-17 โดยวิธีการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

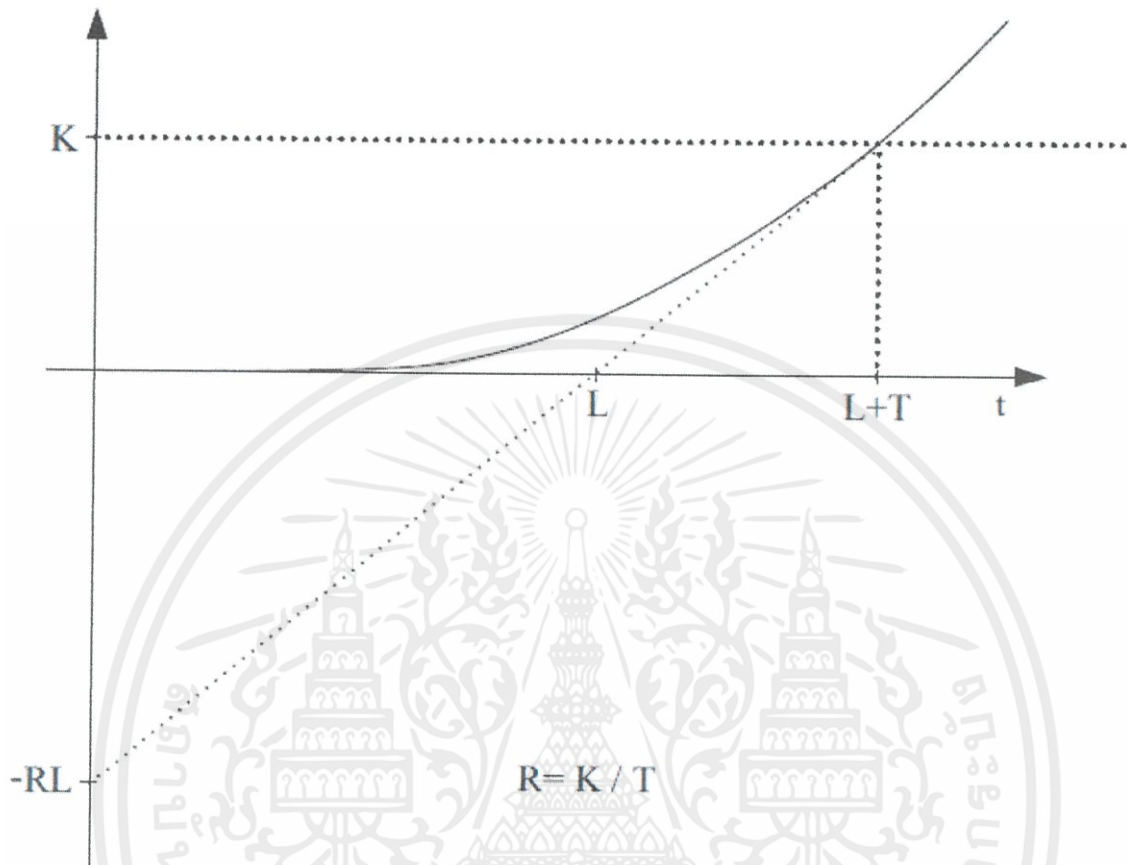
กล่าวคือการบังคับด้วยตัวเอง (With Self-Regulation) และ K เรียกว่าอัตราขยายคงตัว (Stationary Gain) ถ้า Step Response ไม่เข้าสู่ขอบเขตของค่า K เมื่อ $t \rightarrow \infty$ โดยวิธีการกล่าวคือปราศจากการบังคับด้วยตัวเอง (With-Out Self-Regulation)

กระบวนการปราศจากการบังคับด้วยตัวเองและ Step Response ของระบบเข้าใกล้เส้นตรงด้วย Slope R ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.18 กล่าวคือ “With a Single Integrator” หรือ “Integrating” ถ้าทำการสังเกต Step Response ของกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวควบคุม PID ได้ถูกประยุกต์ปรับขึ้นอยู่ด้านเดียวตามคุณลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.17 และ 2.18 ดังนั้นวิธีการออกแบบดั้งเดิมสำหรับตัวควบคุม PID ได้ถูกพัฒนาตามคุณสมบัติที่ตั้งใจไว้ อย่างไรก็ตามการตอบสนองทางอินพุตยังแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงในบางขั้นตอน โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป (ดูในหัวข้อที่ 2.5.6 (ค))



ภาพที่ 2.17 แสดงภาพ Step Response ของกระบวนการควบคุมด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.18 แสดงภาพ Step Response ของกระบวนการ Integrating

พื้นฐานการสมมุติฐานส่วนใหญ่ใช้เพื่อการออกแบบวิธีการอธิบายตามจำนวนเชิงเส้น นั่นคือวิธีการทางเชิงเส้น ถ้าการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการที่อินพุต $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ตามลำดับ $y_1(t)$ และ $y_2(t)$ ดังนั้นการตอบสนองทั้งหมดอินพุต $u_1(t) + u_2(t)$ กลายเป็น $y_1(t) + y_2(t)$ ภายใต้เงื่อนไขของขั้นตอนแรกของระบบ ในทฤษฎีของระบบโดยปกติคาดหมายว่าเป็นจำนวนเชิงเส้นที่เป็นจริงโดยประมาณเป็นส่วนน้อยของค่าตัวแปรต่างๆแม้ว่าค่าผิดพลาดโดยประมาณเพิ่มขึ้นในขอบเขต คาดว่าจะพบกับค่าผิดพลาดบางประการโดยมีแนวทางดังนี้เช่น การตอบสนองในด้านลบมีค่ามากแตกต่างจากตรงกันข้ามของการตอบสนองทางบวก ทั้งที่ความเป็นจริงตามสมมุติฐานถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง อันดับแรก เพราะว่าเป็นการยากที่จะแสดงให้เห็นตัวควบคุมทั่วไปที่สามารถควบคุมได้โดยวิธีที่ปราศจากสมมุติฐาน อันดับสอง จากประสบการณ์แสดงให้เห็นผลลัพธ์การออกแบบการทำงานโดยประมาณไว้เป็นอย่างดีสำหรับหลายๆวิธี และ อันดับสาม เพราะผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในหลายกรณีไม่เพียงพอ อีกทั้งการทดสอบพบค่าผิดพลาดที่ปรับเปลี่ยนจากกระบวนการใช้งานจริงเป็นสิ่งที่ต้องการเสมอและคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นสามารถพิจารณาในการดำเนินงานภายใต้สมมุติฐานของสมการเอกฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถนำไปจำลองการทำงานสำหรับระบบที่ทำงานด้วยการกำหนดกฎเกณฑ์ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(s) = \frac{K}{1+T_s} e^{-Ls} \quad (2.5.4)$$

คือรูปแบบพื้นฐานของระบบ เป็นรูปแบบที่อ้างถึง “First-Order-Lag + Pure-Delay” เพราะว่ามี $K/(1 + T_s)$ คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของ First-Order-Lag ซึ่งอัตราขยายคงที่คือ K และค่าคงที่ทางเวลา คือ T และ e^{-Ls} คือ Pure Delay ซึ่ง Delay Time คือ L รูปของการคำนวณคือ

$$P(s) = \frac{R}{s} e^{-Ls} = \frac{k}{T_s} e^{-Ls}, R = \frac{K}{T} \quad (2.5.5)$$

ค่าตัวแปร K และ T ในสมการที่ (2.5.1) มีจำนวนมากกว่า 1 และไม่สามารถอธิบายทางคณิตศาสตร์ ในการค้นหาด้วยลักษณะเฉพาะ อย่างไรก็ตามบางครั้งมีการใช้สมการในกรณีนี้รู้ค่า ตัวแปรคือค่าคงที่ทางเวลาของระบบ อันดับแรก เพื่อสร้างตัวหารร่วม T_s ที่ประเมินค่าไม่ได้ตั้งนั้นระยะเวลาของเส้นกราฟการทำงานได้มาตรฐานและ อันดับสอง เพื่อสร้างสมการที่ให้กราฟสูงชันของปฏิกิริยาการทำงานสมการ “First-Order-Lag + Pure-Delay” ในภายหลังมีการใช้สูตรคำนวณค่าของตัวแปร PID นำไปปรับใช้โดยชัดเจนพิจารณาในหัวข้อที่ 2.5.5(ค)

ในรูปแบบด้านบนได้ถูกใช้งานเป็นเวลานานโดยหลักพื้นฐานของวิธีการออกแบบสำหรับระบบควบคุม PID เพราะค่าตัวแปรต่างๆ สามารถคำนวณได้ง่ายจากการทดลองเบื้องต้นพิจารณาหัวข้อที่ 2.5.5(ข) และผลลัพธ์ของการออกแบบนั้นเป็นจำนวนสม่าเสมอตามที่กำหนดค่าเริ่มต้นของการทดลองปรับจูนและค่าผิดพลาด แต่ในระยะเวลาหลังได้มีการใช้ความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่และระบบเซ็นเซอร์ต่างสำหรับการปรับจูนตัวควบคุมตามถูกต้องและเป็นไปได้โดยพื้นฐานการทดสอบขั้นต้นหรือข้อมูลจริง เพื่อวัตถุประสงค์นั้นใช้รูปแบบที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นจากประสบการณ์ต่างๆในการพิจารณาในหัวข้อที่ 2.5.6(ค)

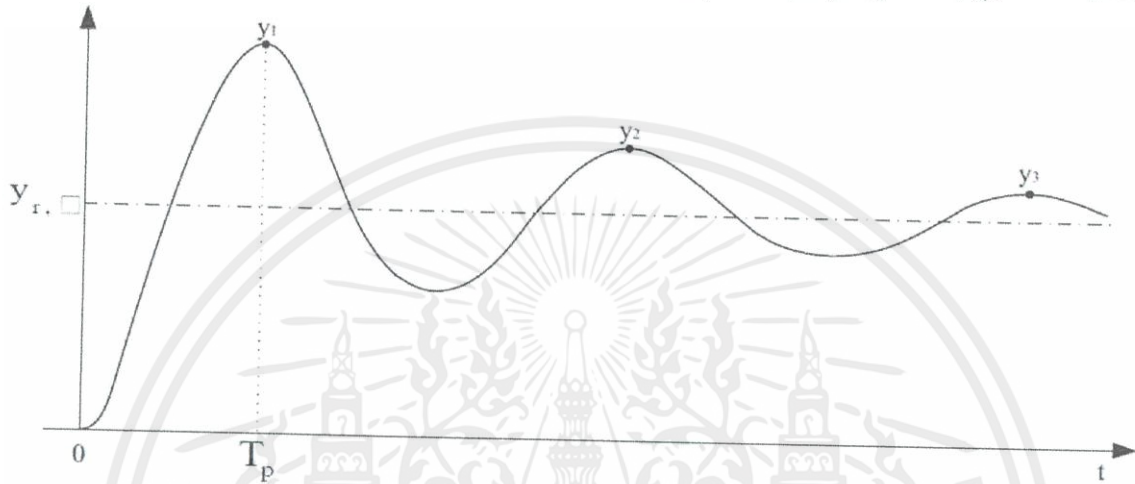
2.5.3 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุม PID

ระบบควบคุม PID คือการประเมินค่าการทำงานทั่วไปโดย “Unit Step Set Point Response” และ “Unit-Step Disturbance Response” เมื่อ “Unit-Step Set point Response” คือการตอบสนอง $y_{r,step}(t)$ ในการปรับค่าของ Unit-Step Set Point $r(t) = f_{step}(t)$ เข้าสู่ระบบควบคุมในเวลาชั่วขณะ ขณะสัญญาณรบกวนมีค่า $d(t) = 0$ การตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนของ Unit-Step (Unit-Step Disturbance Response) คือการตอบสนอง $y_{d,step}(t)$ ของการปรับเปลี่ยนค่าไปสู่ Unit-Step Disturbance $d(t) = f_{step}(t)$ ที่เข้าไปในระบบควบคุมชั่วขณะหนึ่ง กำหนดให้ค่า Set Point $r(t) = 0$ คุณสมบัติที่สำคัญที่ต้องการสำหรับการตอบสนองนั้นๆ คือการเข้าสู่ค่าคงที่ $y_{r,\infty}$ และ $y_{d,\infty}$ ตามลำดับ ภายใต้สมมุติฐานในการเป็นเชิงเส้นนั้นมีคุณสมบัติเทียบเท่าความเป็นเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยเสถียรภาพคือสภาวะการรับรองโดยวิธีการต่างๆและการประเมินของระบบควบคุมต้องมาจากภายใต้สภาวะเงื่อนไขเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่า เสถียรภาพของ “Steady-State Error” $\epsilon_{r,\infty}$ และ $\epsilon_{d,\infty}$ ของ Unit-Step Set Point Input และสัญญาณรบกวนทาง Input ของ Unit-Step ซึ่งหาได้จากวิธีการดังกล่าวตามลำดับ และขนาดของมันมาจากการประเมินค่าที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพของ Steady-State

$$\epsilon_{r,\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \{1 - y_{r,\text{step}}(t)\} = 1 - y_{r,\infty} \text{ และ } \epsilon_{d,\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \{1 - y_{d,\text{step}}(t)\} = -y_{d,\infty} \quad (2.5.6)$$



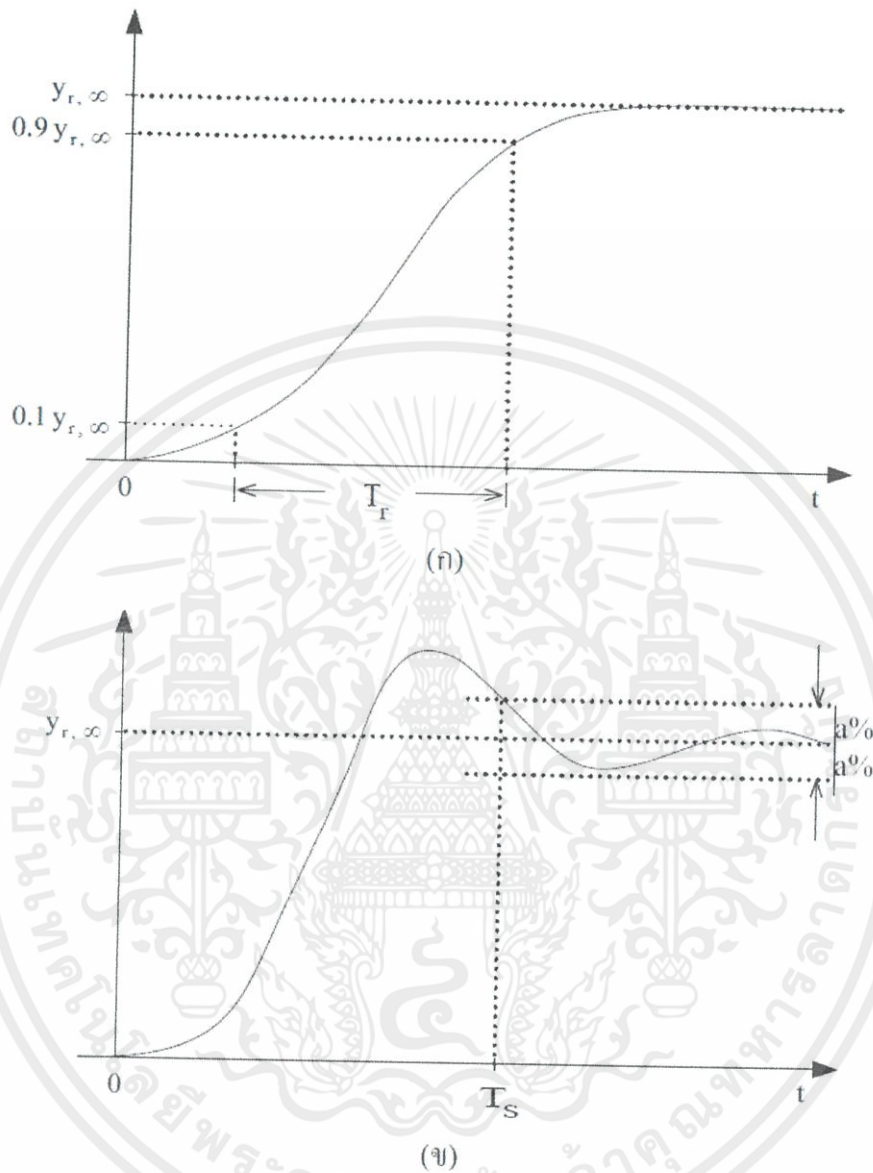
ภาพที่ 2.19 แสดงภาพการแกว่งของสัญญาณตอบสนองเข้าสู่ Set Point

คุณสมบัติต่อมาคือการประเมินค่าการแกว่งตามปกติของการตอบสนอง อันดับแรก คือการแกว่งของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับค่าของการกำหนดค่า Set Point อย่างรวดเร็ว อันดับสอง สำหรับกระบวนการปรับค่ามาจากการพิจารณาค่า Set Point ที่มากกว่าค่าเดิมสามารถทำให้มีผลกระทบต่อชิ้นงานเช่นกับกระบวนการทำงาน อันดับสาม สำหรับระบบควบคุมแบบป้อนกลับตามภาพที่ 2.16 โดยปกติการแกว่งของสัญญาณตอบสนองจะมีขนาดเล็กและมีขอบเขตที่แน่นอนดังนั้นการตอบสนองไม่ต้องการการแกว่งมากเกินไปสำหรับการประเมินค่าตามคุณสมบัตินี้ คือการใช้การตอบสนองของ Unit-Step Set Point $y_{r,\text{step}}(t)$ สมมติว่า $y_{r,\text{step}}(t)$ มีค่าสูงสุดแสดงในภาพที่ 2.19 และให้ความสูงของ i -th สูงเท่ากับ ค่า “overshoot value” A และ “decay ratio” ζ หาได้ตามที่ y_{max} คือค่าสูงสุดของ $y_{i,s}$

$$A = \frac{y_{\text{max}} - y_{r,\infty}}{y_{r,\infty}} \times 100 \text{ และ } \zeta = \frac{y_2 - y_{r,\infty}}{y_1 - y_{r,\infty}} \quad (2.5.7)$$

สมการนี้จะถูกใช้ในการหาค่ารูปคลื่นของการตอบสนอง ซึ่งโดยทั่วไปแนะนำว่าขนาดของ A ไม่ควรมีขนาดมากกว่า 20% และ ζ ไม่มากกว่า 4% ในบางครั้งจะมีค่า Overshooting เกิดขึ้น นั่นคือสิ่งที่สำคัญที่จะทำให้ $A=0$ (ตัวอย่างเช่น ในการตอบสนองจาก Overshoot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 แสดงภาพช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาที่กำหนดไว้

(ก) ช่วงเวลาขาขึ้น

(ข) ช่วงเวลาที่กำหนดไว้

คุณลักษณะที่สำคัญอื่นๆคือ ความเร็วในการตอบสนองของ Unit-step Set Point $y_{r,step}(t)$, เวลาเริ่มต้น (Rise Time) คือค่าเวลาที่หาได้จาก $y_{r,step}(t)$ ที่มีค่าระหว่าง 10% ถึง 90% ของ $y_{r,\infty}$ และช่วงเวลาที่กำหนด (Setting Time) T_s เป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุดที่พบว่าไม่มีความสมดุล โดยค่าที่ใช้บ่อยๆของ a คือ โขงนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{|y_{r,step}(t) - y_{r,\infty}(t)|}{y_{r,\infty}(t)} \times 100 \leq a \text{ เมื่อ } t \geq T_s \quad (2.5.8)$$

ช่วงเวลาเริ่มต้น (Rise Time) และช่วงเวลาที่กำหนด (Setting Time) ดังแสดงในภาพที่ 2.23 มีสองค่า สำหรับการประมาณความเร็วและตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ระบบทำงานได้ในเวลาเพียงวินาทีจนกระทั่งถึงชั่วโมง ขึ้นอยู่กับกระบวนการ

$$\int_0^\infty t |Y_{r,step}(t) - Y_{r,\infty}| dt \text{ และ } \int_0^\infty t |Y_{d,step}(t) - Y_{d,\infty}| dt \quad (2.5.9)$$

ก่อนหน้านี้มีค่าอยู่ 2 ชนิด ที่เกี่ยวกับรูปคลื่นและความเร็วในการตอบสนอง Unit-Step point $Y_{r,step}(t)$ ซึ่งเกี่ยวกับประสิทธิภาพการเลือกใช้ในสภาวะชั่วขณะ (Transient State) แต่สิ่งที่ได้รับจากการวิเคราะห์วิธีการออกแบบซึ่งต้องมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ดังแสดงให้เห็นจากตัวอย่าง ITAE (Integrated Time-Weight Absolute Error), ซึ่งได้จากสมการ

$$\int_0^\infty t |Y_{r,step}(t) - Y_{r,\infty}|^2 dt \text{ และ } \int_0^\infty t |Y_{d,step}(t) - Y_{d,\infty}|^2 dt \quad (2.5.10)$$

ITAE สามารถอธิบายประสิทธิภาพของสภาวะชั่วขณะ (Transient State) และถูกนำไปใช้งานร่วมกับหลักพื้นฐานสำหรับวิธีการของ ISE (Integrated Square Error) มีวิธีการควบคุมการปรับลดจำนวนโดยวิธีของ ITAE หรือเรียกว่า การควบคุมค่าที่เหมาะสมในระบบเชิงเส้น LQ (Optimal Linear Quadratic Control) นั้น สำคัญไม่น้อยไปกว่าวิธีการออกแบบแต่ทว่าการออกแบบพื้นฐานในการคำนวณเพื่อความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการควบคุมแบบเก่าและแบบใหม่

ค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัวในรูปคลื่น (ตัวอย่างเช่น ค่า Overshoot และ อัตราหน่วง Damping Ratio) และ ความเร็ว (ตัวอย่างเช่น Rise Time และ Setting Time) คือส่วนประกอบสำคัญของการประเมินประสิทธิภาพนั้นสามารถสังเกตเห็นได้ชัดในการจำลองหรือขณะระบบควบคุมทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด แต่ว่ามีส่วนประกอบอื่นๆที่สำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบนั้นคือ (Robustness) หมายถึงความทนทานของระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับค่าผิดพลาดของแบบจำลองและความแตกต่างในคุณลักษณะของกระบวนการ ตัวชี้วัดที่ง่ายที่สุดของ Robustness คืออัตรายาย และ Phase Margin ซึ่งตัวชี้วัดในการออกแบบระบบควบคุม PID นั้น มีอัตรายายคงที่ระหว่าง 3-10dB และมุม Phase margin 20 องศา ในที่นี้ค่า 3dB และมุม Phase Margin 20 องศา คือค่าที่น้อยที่สุดที่สามารถกำหนดได้และเมื่อทำการเลือกค่านี้แล้วโดยปกติระบบควบคุมจะมีการแกว่งตัวสูงกว่าปกติและสามารถเข้าสู่ความไม่มีเสถียรภาพโดยง่าย ถ้าความหน่วง และความคงทน มีค่าเพียงพอดตามที่คาดไว้ มุมของ Phase Margin จะมีค่ามากกว่า 50 องศา คือค่าที่แนะนำ กระบวนการวิธี LQ ที่กล่าวไปแล้ว ดังเช่น ค่า Phase Margin ที่มากกว่า 60 องศา และ ไม่จำกัดขอบเขตของอัตรายาย ได้รับการยืนยันโดยการประเมินค่าความคงทน ในการจำลองการออกแบบซ้ำๆ สำหรับระบบที่สามารถทำงานได้ หรือทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขระบบการทำงาน ในทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่ ปฏิกริยาที่ตอบสนองในการทำให้ระบบสมบูรณ์คือ เครื่องมือในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชี้วัดค่าความหนานของระบบ (ดูในแนวคิดของควมมีเสถียรภาพ การควบคุมค่าที่เหมาะสมของระบบเชิงเส้น และการควบคุมความหนาน)

2.5.4 ลักษณะการทำงานของตัวควบคุม PID

ในการประยุกต์ใช้งาน วิศวกรจะมีอิสระในการเลือกใช้ฟังก์ชันทั้งสาม (P, I, และ D) ของตัวควบคุมอะไรก็ตามในการแก้ไขปัญหาต่าง จำเป็นต้องพิจารณาเตรียมความพร้อมในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น การรวมองค์ประกอบ (S) เพื่อใช้งานเราเรียกว่า โหมดการทำงาน (Action Mode) ของตัวควบคุม PID ตามทฤษฎีแล้วมีอยู่ 7 ชนิด แต่มี 5 ชนิด ที่สำคัญในการเลือกใช้งานดังแสดงในตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะการทำงานของแต่ละชนิดของตัวควบคุม PID

Action mode	Element(s) used	Transfer function C(s)
Proportional (P)	P element only	$C(s) = K_P$
Integral (I) with $T_I = 1$	I element only	$C(s) = K_P/s$
Proportional-Integral (PI)	P and I element	$C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$
Proportional-Derivative (PD)	P and D element	$C(s) = K_P \{ 1 + T_D D(s) \}$
Proportional-Integral-Derivative (PID)	All 3 element	$C(s) = K_P \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D D(s) \right\}$

2.5.5 การออกแบบระบบควบคุม PID

การออกแบบ คือขั้นตอนทางวิศวกรรมที่รวมการทดสอบและวัดผลค่าผิดพลาด (Trial-and Error) โดยวิธีการแตกต่างกัน ในการออกแบบระบบควบคุม PID มีสามขั้นตอนพื้นฐานที่ต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นอันดับแรกและทำการวัดผลซ้ำถ้าผลลัพธ์ออกมาไม่เป็นที่น่าพอใจ

ก) การเลือกโหมดการใช้งาน

ในการเลือกโหมดการทำงานของตัวควบคุม PID มีความจริงที่สำคัญสองอย่างดังนี้ อันดับแรก ในขั้นตอนการหา ค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady-state errors) $y_{r,\infty}$ และ $\epsilon_{d,\infty}$ เข้าสู่ศูนย์ โดยลำดับ คือสิ่งจำเป็นและเพียงพอที่จะรวมเข้ากับตัวประกอบ I ของตัวชดเชย (Compensator) C(s) อันดับสอง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวประกอบ I ใน $C(s)$ ทำให้ระบบควบคุมมีการแกว่งไปมาและในที่สุดแล้วจะไม่เสถียร โดยเฉพาะการสร้างอัตรายายและ Phase Margins น้อยลง

วิธีการอธิบายดังต่อไปนี้ เราจะทำการสมมุติว่ากระบวนการจากสมการที่ (2.5.2) และ (2.5.3) คือชนิดของตัวควบคุม PID ที่ถูกเลือกใช้งานมากที่สุด โดยคำนวณจากการตอบสนองของควมถี่ของตัวชดเชย (Compensator) $C(s)$ นั้นพบว่ามีเปลี่ยนแปลงของอัตรายายย้อนกลับ $P(s)C(s)$ ของระบบควบคุมที่แสดงในภาพที่ 2.16 คือการเพิ่มมุม 90 องศา โดยเปรียบเทียบกับตัวกระบวนการ (Process) $P(s)$ ถ้าตัวควบคุม $C(s)$ ตั้งไว้เป็น I ที่ทุกควมถี่ และจะเพิ่มขึ้น 90 องศา ในย่านควมถี่ต่ำ (เช่น เมื่อ $\omega \ll 1/T_1$) แต่ยังคงสภาวะหรือลดลงในย่านควมถี่สูง (เช่น เมื่อ $\omega \gg \frac{1}{T_1}$) ถ้าตัวควบคุม $C(s)$ ถูกตั้งในโหมด PI หรือ PID ส่วนการเคลื่อนเฟส (Phase Shift) ตามธรรมชาติเพราะการลดลงของ Phase Margin เมื่อกระบวนการเข้าสู่การควบคุมด้วยตนเอง (Self-Regulation) เช่น เมื่อ $P(s)$ ได้จากสมการที่ (2.5.3) สภาวะคงตัวลดลงสามารถยกเลิกโดยการใช้อัตรายายสัดส่วน (Proportional Gain) K_p จำนวนเล็กน้อยก็เพียงพอ อย่างไรก็ตามเมื่อกระบวนการรวมกัน เช่นเมื่อ $P(s)$ ได้จากสมการที่ (2.5.4) นอกจากนั้นจากการเพิ่ม การเคลื่อนเฟส (Phase Shift) จากสภาวะสำคัญ ในความเป็นจริง ถ้าตัวควบคุม $C(s)$ ตั้งในโหมด I สำหรับการรวมกันของตัวควบคุม การเคลื่อนเฟสของอัตรายายย้อนกลับ มีค่ามากกว่า 180 องศา ที่ทุกควมถี่ และจะนำไปสู่ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่สามารถทำงานได้และมีเสถียรภาพ ดังนั้นในการเลือก ตัวควบคุมชนิด I สำหรับกระบวนการอินทิกรัลในการควบคุม กรณีเลือกใช้งานตัวควบคุมชนิด PI และ PID ที่ทำงานได้รวดเร็วกว่า ถ้าช่วงเวลาอินทิกรัล T_i ของตัวชดเชย $C(s)$ ในกระบวนการควบคุมชนิด PI และ PID ทำการเลือกตัวควบคุมกระบวนการ $P(s)$ ที่มีค่ามากพอในการเคลื่อนเฟส (Phase Shift) ของตัวควบคุมกระบวนการ $P(s)$ ซึ่งมีความถี่ $\omega = 1/T_i$ ที่มีค่าเล็กน้อยเพียงพอ (ในที่นี้หมายถึงค่าของมุมที่มีค่าน้อยกว่า 90 องศา เพราะว่าการกระบวนการอินทิกรัลของตัวควบคุม $P(s)$) การเคลื่อนเฟส (Phase Shift) โดยรวมสามารถสร้างให้มีขนาดน้อยกว่า 10 องศา ในช่วงเวลาที่กำหนด ดังนั้นขอบเขตของการเคลื่อนเฟส (Phase Margin) สามารถกำหนดให้มีค่าเป็นบวก โดยการเลือกสัดส่วนอัตรายาย K_p อย่างเหมาะสมและจะได้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีเสถียรภาพ แต่ถึงแม้ว่าจะสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าว การเคลื่อนเฟสของอัตรายายย้อนกลับ (Return Ratio) ในย่านควมถี่ต่ำมีจำนวนใกล้เคียงกับ 180 องศา แต่ในความเป็นจริงนั้นทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ไม่เพียงแต่เพิ่มขึ้นแต่กลับมีการลดลงเช่นกันโดยการลดสัดส่วนอัตรายาย K_p กับ Phase Margin และในที่สุดจะทำให้ระบบควบคุมเกิดการแกว่งขึ้น นั้นหมายถึงการกำหนดขอบเขตของสัดส่วนอัตรายาย K_p ที่ไม่จำกัดภายใต้วิธีทั้งสอง และแกว่งอยู่ในช่วงแคบๆอย่างต่อเนื่อง ในที่สุดการปรับจูนค่าตัวแปรของระบบควบคุมเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งค่าตัวแปรป้อนกลับไปยังตัวควบคุมเป็นสิ่งสำคัญ เมื่อคุณลักษณะของกระบวนการเปลี่ยนแปลง และเกิดขึ้นอย่างบ่อยครั้งภายใต้เงื่อนไขของระบบควบคุม

ต่อมาคือตัวชี้วัดสำหรับการเลือกชนิดของตัวควบคุม ในกรณีของระบบควบคุมได้ด้วยตนเอง (Self-Regulation) มีวิธีการทั่วไปคือการเลือก PI หรือ PID ซึ่งวิธีการเป็นกระบวนการที่ปราศจากความผิดพลาด ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงตัว (Steady-State Error) เข้าสู่ Input โดยการเพิ่มตัวแปร D เข้าไป (ตัวอย่างเช่น ในการใช้งานตัวควบคุมชนิด PID) ทำให้ความไวในการตอบสนองดีขึ้น และด้วยเหตุผลนั้นได้ถูกนำไปใช้ในระบบควบคุมที่มีสัญญาณรบกวนสูง อย่างไรก็ตามตัวควบคุมชนิด D ทำหน้าที่อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อค่าตัวแปรได้รับการปรับจูนอย่างเหมาะสมเท่านั้น หมายความว่า การดูแลรักษาที่ดีนั้นมีความจำเป็นในทางเลือกที่สอง ในกรณีของกระบวนการอินทิกรัล ลักษณะของการแกว่งจะลดลงเนื่องจากการรวมตัวควบคุมชนิด I ที่เหมาะสม ตามที่ได้อธิบายไว้ด้านบน ดังนั้นวิธีการทดลองเบื้องต้นในการเลือกใช้การควบคุมชนิด P หรือ PD แต่การควบคุมชนิด PI และ PID ควรจะได้รับการเลือกใช้งานถ้าสามารถทำให้เกิดสถานะค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวเป็นศูนย์ (Steady-State Errors) $\epsilon_{r,\infty}$ ตามต้องการ ในกรณีนี้วิธีการปรับจูนขั้นต้นเช่นเดียวกับการบำรุงรักษาสภาพการทำงานควรได้รับความระมัดระวังอย่างมาก การรวมตัวประกอบ D ในการใช้งานที่เหมาะสมและในหลายกรณีที่เป็น ในการป้องกันสัญญาณการแกว่งที่ไม่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วการเลือกใช้ตัวควบคุมชนิด P เป็นองค์ประกอบที่ง่ายต่อการออกแบบและการดูแลรักษา ดังนั้นการใช้งานในระบบที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง นั้นไม่ใช่สิ่งที่ต้องการ แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

ข) เอกลักษณะของตัวแปรในการทำงาน

มีวิธีการแสดงเอกลักษณะพิเศษอยู่ 2 อย่างที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการออกแบบระบบควบคุม PID โดยการทดสอบความไวของการตอบสนอง (Ultimate Sensitive Test) และวิธีการตอบสนองของสัญญาณ (Step-Response Method) Ultimate Sensitive Test นั้น ทำให้ได้ผลลัพธ์พื้นฐาน ตามที่เข้าใจสำหรับกระบวนการในการทำงานตามโครงสร้างของระบบควบคุมในตามภาพที่ 2.16 ประกอบด้วยตัวขดเชย $C(s)$ ในรูปของตัวประกอบ P และการเพิ่มอัตราขยายสัดส่วนที่ละน้อย โดยเริ่มด้วยค่าที่น้อยมากและมีเงื่อนไขว่าคุณลักษณะในกระบวนการควบคุมตามสมการที่ (2.5.3) หรือ (2.5.4) ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะยังคงมีเสถียรภาพในตอนแรก หลังจากนั้น จะเข้าสู่ขีดจำกัดสูงสุดของความถี่เสถียรภาพในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยแสดงการแกว่งไปมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ (Sin Wave) ค่า K_{pu} ของสัดส่วนอัตราขยายในตอนนั้นมีค่าสัมพันธ์กับอัตราขยายสูงสุด (Ultimate Gain) และคาบเวลา t ของสัญญาณไซน์ที่แสดงคือ คาบเวลาสูงสุด (Ultimate Period) ความถี่เชิงมุมสูงสุด ω_u (Ultimate Angular Frequency) หาได้จาก $\omega_u = 2\pi/T_u$ ตามฟังก์ชันถ่ายโอน $P(s)$ ที่ตรงข้ามกับแกนจำนวนจริงฝั่งลบ (Negative Real Axis) $s = j\omega_u$ และอัตราขยาย $|P(j\omega_u)|$ ที่ตำแหน่ง $1/K_{pu}$ ดังนั้น การทดสอบต่อความไวในการตอบสนองสูงสุด แสดงให้เห็นข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับการตอบสนองของความถี่ $P(j\omega)$ ของกระบวนการที่ตำแหน่งตรงข้ามกับกับแกนจำนวนจริงทางลบ หรือในการควบคุมแบบอื่น ๆ นั้นได้ทำการทดลองโดยมาแสดงข้อมูลที่ความถี่ใดๆ

อัตราขยายสูงสุดและคาบเวลาสูงสุดคือการวิเคราะห์คุณลักษณะพิเศษของกระบวนการที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของขอบเขตความเป็นเสถียรภาพ ในกรณีส่วนใหญ่เลือกใช้ตัวแปรในการคุมโดยตรงดูในหัวข้อที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5(ค) แต่ว่าพวกเขาสามารถใช้การประเมินค่าตัวแปรต่างๆในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ สำหรับสมการที่ (2.5.4) ของกระบวนการอินทิกรัล โดยค่าตัวแปรต่างๆ สามารถหาได้จากสมการ

$$L = \frac{T_u}{4}, R = \frac{2}{K_{pu}T_u} \quad (2.5.11)$$

ซึ่งมาจากทฤษฎีของ Nyquist ในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของสมการ (2.5.3) ซึ่งมีตัวอย่างการทดลองมากมายที่จะอธิบายต่อไป ข้อมูลเชิงตัวเลข ได้รับมาจากมาตรฐานการทดสอบความไวในการตอบสนองเพียงเล็กน้อย และข้อมูลจำนวนหนึ่งที่ต้องการยกตัวอย่างเช่นข้อมูลที่สามารถได้รับโดยการปรับแก้การทดสอบความไวในการตอบสนองสูงสุด ซึ่งตัวชดเชยได้ถูกกำหนดในส่วนประกอบ I ซึ่ง $T_I = 1$ โดยการทดสอบจากการปรับแต่งที่ได้รับจากการประเมินค่าตัวแปรข้อมูลมากกว่าสองที่เป็นไปได้ของสมการที่ (2.5.3) และ รูปแบบที่ได้จากสมการเบื้องต้นของสมการ (2.5.15) และ (2.5.16) ดูในหัวข้อที่ 2.5.6(ค)

ในวิธีการของการทดสอบ (Step Response Test) (ตัวอย่างเช่น ในการบันทึกค่าปฏิกริยาเส้นโค้ง “Reaction Curve”) คือการนำไปสู่กระบวนการแรกของการปฏิบัติงานจริง ในที่นี้จุดสำคัญในการพิจารณากระบวนการที่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมแบบเปิด (Open Loop) ในการทดสอบ Step Response ของกระบวนการที่ปราศจากการป้อนกลับ

ดังนั้นค่าของตัวแปรของในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนที่คำนวณไว้ ซึ่ง Step Response จะสมบูรณ์ที่สุดในช่วงเวลาหนึ่ง วิธีการที่ง่ายที่สุดการสมมติค่าในสมการ (2.5.2) และ (2.5.3) ในการกำหนดค่าตัวแปรดังแสดงในภาพที่ 2.17 หรือ 2.18 ในกรณีของกระบวนการที่มีการควบคุมตัวเอง (Self Regulation) ค่าอัตราขยายคงที่ K คือการพิจารณาจากเส้นโค้งของการตอบสนอง (Reaction Curve) ตามค่าเวลาที่มากของ t ดังนั้นเส้นตรงที่ลากมาสัมผัสกับเส้นโค้งระหว่าง T และ L ของสมการ (2.5.3) ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ในกระบวนการอินทิกรัลเส้นตรงที่สัมผัสกับเส้นโค้งที่ตอบสนองระหว่างค่า R และ L ของสมการที่ (2.5.4) ดังแสดงในภาพที่ 2.18 จากตำแหน่งก่อนหน้าค่าตัวแปร K และ T ในสมการสองของสมการที่ (2.5.4) ที่หาค่าได้ง่ายกว่าอีกสมการหนึ่ง ดังนั้นสามารถเลือกใช้สมการใดสมการหนึ่งตามความสะดวกของวิศวกร และอีกทางเลือกหนึ่งของวิธีการนี้คือ T ดังปฏิกริยาเส้นโค้งจะแสดงการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีความหมายสำคัญในช่วงเวลาเริ่มต้นที่อยู่ระหว่างคาบเวลา T แม้วิธีการคำนวณด้านบนเป็นวิธีแบบเก่าที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม PID ทฤษฎีที่ประยุกต์ขึ้นมาใหม่อีกหลายทฤษฎีสามารถใช้ในตัดสินใจของกระบวนการจำลองค่าตัวแปรต่างๆที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือวิธีการ (Least Squared-Error Method) ซึ่งค่าต่ำสุดของการอินทิกรัลค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณตอบสนองของแบบจำลองกระบวนการทำงานจริง) การปรับจูนค่าตัวแปรของ PID

“การปรับจูน” คือกระบวนการทางวิศวกรรมที่ใช้ในการปรับแต่งค่าตัวแปรต่างๆของตัวควบคุม เพื่อที่จะกำหนดคุณสมบัติในการออกแบบระบบควบคุม มีสองวิธีในการปรับจูน ซึ่งถูกนำเสนอโดย Zeigler และ Nichole ในปี 1942 ซึ่งได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในแบบดั้งเดิมและในแบบปรับปรุงใหม่ หนึ่งในนั้นกล่าวถึงวิธีการตอบสนองความไวของ Zeigler และ Nichole ในการกำหนดค่าตัวแปรดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 K_{pu} และ T_u ได้มาจากทดสอบของความไวในการตอบสนองสูงสุด หรืออีกวิธีหนึ่งกล่าวโดยวิธีการ Step response ของ Zeigler และ Nichole ดังแสดงในสมการที่ (2.5.4) พิจารณาค่าตัวแปรของตัวควบคุม PID ดังแสดงในภาพที่ 2.18 โดยพิจารณาค่าตัวแปร R และ L ในสมการที่ (2.5.4) ซึ่งได้จากการทดสอบ Step Response ดังแสดงในภาพที่ 2.18

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าที่ได้จากวิธีการตอบสนองความไวสูงสุดของ Zeigler และ Nichole

Action mode	K_p	T_I	T_D
P	$0.5 K_{pu}$	-	-
PI	$0.45 K_{pu}$	$0.833 T_u$	-
PID	$0.6 K_{pu}$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการตอบสนอง Step response ของ Zeigler และ Nichole ($RL \neq 0$)

Action mode	K_p	T_I	T_D
P	$1/RL$	-	-
PI	$0.9/RL$	$3.33L$	-
PID	$1.2/RL$	$2L$	$0.5L$

ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่า Step response ของ Zeigler และ Nichole สามารถนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมตัวเองได้เช่นกันโดยการพิจารณากระบวนการอินทิกรัลทั้งหมดในการประมาณวิธีการทำงานสำหรับค่า t ที่ไม่มาก โดยจำเป็นต้องคาดการณ์ในกรณีทำงานจริง ดังแสดงในสมการที่ (2.5.3) โครงสร้างกราฟเส้นโค้งของการทำงานในกระบวนการอินทิกรัลของทั้งหมดโดยยึดเวลาที่แท้จริงของกราฟเส้นโค้งการทำงาน “Reaction curve” ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลง) ดังนั้น ในการพิจารณาตัวแปรของตัวควบคุม PID โดยการใช้สูตรต่างๆในตารางที่ 2.4 ในกระบวนการจริงของการอินทิกรัล วิธีการนี้สามารถกำหนดได้อย่างแน่นอน กล่าวง่าย ๆ คือการหาค่า R ของตารางที่ 2.4 เมื่อ K/T ซึ่ง K และ T คือตัวแปรในสมการที่ (2.5.3) และการประยุกต์ใช้สูตรตารางที่ 2.4 การประยุกต์ใช้งาน วิธีนี้ใช้เพื่อจุดประสงค์การเริ่มต้นการควบคุมแบบป้อนกลับจากการเริ่มต้นในตอนเริ่มกระบวนการในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพภายใต้ขอบเขตของความถี่ กล่าวคือการใช้วิธีการ Step Response ของ Zeigler และ Nichole ในกระบวนการที่ควบคุมด้วยตัวเองได้ ในการปรับค่าตัวแปรที่นอกเหนือค่าที่ต้องการไปสู่ค่าที่ปลอดภัย โดยตระหนักถึงอัตราขยายที่วัดได้จริงและ Phase Margins ไปสู่ค่าที่มากกว่าที่คาดไว้ในกระบวนการของการอินทิกรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงวิธีการปรับจูนของ Chien-Hronse-Reswick

Response to be optimized	Overshoot	Action mode	K_P	T_I	T_D
Set Point response	Zero	P	0.3T/KL	-	-
		PI	0.35T/KL	1.17T	-
		PID	0.6T/KL	T	0.5L
	20%	P	0.7T/KL	-	-
		PI	0.6T/KL	T	-
		PID	0.95T/KL	1.36T	0.47L
Disturbance response	Zero	P	0.3T/KL	-	-
		PI	0.6T/KL	4L	-
		PID	0.95T/KL	2.38L	0.42L
	20%	P	0.7T/KL	-	-
		PI	0.7T/KL	2.33L	-
		PID	1.2T/KL	2L	0.417L

ในการปรับค่าตัวแปรของสมการที่ (2.5.3) ซึ่งมีค่าระหว่าง $0.05 \leq L/T \leq 1.0$ มีวิธีการปรับจูนมากมายที่ได้รับการนำเสนอและถูกนำมาใช้หลังจากทฤษฎีของ Zeigler และ Nichole โดยมีอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาทบทวนทฤษฎีเหล่านั้นคือ ทฤษฎีวิธีการปรับจูน ของ Chien-Hronse-Reswick โดยการอ้างอิงสมมติฐานจากสมการที่ (2.5.3) และได้รับการปรับจูนตามหลักเกณฑ์ที่แสดงในตารางที่ 2.5 โดยวิธีการจำลองผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ออนไลน์ สูตรคำนวณในตารางที่ 2.5 สามารถนำไปปรับใช้ในขอบเขตที่จำกัดของค่า L/T ตามที่เข้าใจ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทดลองซึ่งได้จากสูตร ซึ่งไม่ใช่เรื่องง่ายในการนำไปปรับใช้โดยแสดงผลที่ชัดเจนในขอบเขตที่กำหนด แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าระหว่าง $0.05 \leq L/T \leq 1.0$ คือค่าที่เหมาะสมคุณลักษณะเด่นอื่นๆของวิธีการปรับจูนด้วยวิธีของ Chien-Hronse-Reswick ทั้ง 4 วิธีในตาราง ได้มาจากการตอบสนอง (เช่น Step-Response หรือ Disturbance Response) ที่ได้รับการปรับแต่งที่เหมาะสมและไม่ว่าจะเข้าสู่ Overshoot หรือไม่ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานวิธีการทางวิศวกรรมควรตัดสินใจเลือกใช้ตาราง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกเกี่ยวกับการตอบสนองที่เหมาะสมนั้นเป็นการยาก เพราะว่าการปรับค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อการรบกวนโดยปกติเป็นสาเหตุของการตอบสนองที่ไม่ดีของ Set Point และในทางกลับกันของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานการณ์ที่ว่ามี ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งเส้นประคือการตอบสนองของการปรับจูนที่เหมาะสมของระบบควบคุมสำหรับการรบกวนของ Input ตามสมมติฐานของกระบวนการตั้งสมการนี้

$$P(s) = \frac{1}{1+s} e^{-0.2s} \quad (2.5.12)$$

จำไว้ว่าการตอบสนองของสัญญาณรบกวนตามเส้นประนั้นเปรียบเทียบกับเส้นตรงแล้วมีการตอบสนองช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด และอีกวิธีหนึ่งคือค่า Overshoot ของการตอบสนองสู่ Set Point ในช่วงที่มีเส้นทึบมีมากกว่า 50% ในการแก้ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้สมการอันดับสองพิจารณาดูหัวข้อที่ 2.5.6(ข)



ภาพที่ 2.21 แสดงภาพการตอบสนองทั่วไปของระบบควบคุม PID

(ก) การตอบสนองต่อสัญญาณของ Unit-Step เข้าสู่ Set Point

(ข) การตอบสนอง Unit-Step ต่อสัญญาณรบกวน

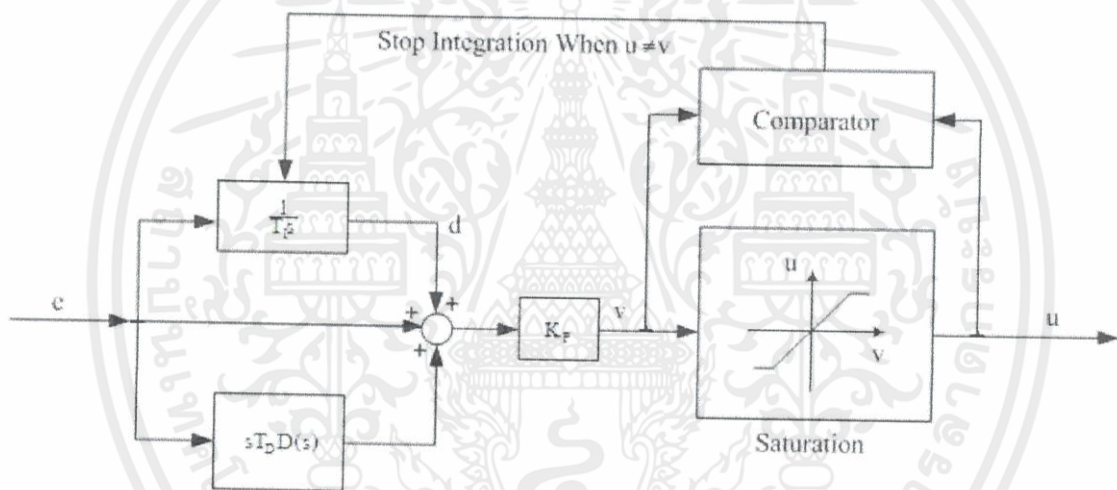
2.5.6 สรุปสาระสำคัญ

ก) บทสรุปของส่วนประกอบ Integral และพฤติกรรมทางกล Anti-Windup

สำหรับเหตุผลที่แตกต่างกันทางกายภาพ การปรับค่าตัวแปรที่เหมาะสมทำให้เกิดภาวะอิ่มตัว (Saturation) นั้นสามารถป้อนค่าภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดเท่านั้นคือ $u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของถังความร้อน (Heating Tank) การไหลของเชื้อเพลิงสามารถมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และค่าสูงสุดที่ได้รับ

จากพื้นที่หน้าตัดของท่อลำเลียงและค่าความดันที่แตกต่างกันเมื่อตัวควบคุมป้อนคำสั่งภายใต้เงื่อนไขการตอบสนองทางกลจะหยุดการทำงานโดยปกติและค่าผิดพลาดจะมีค่ามากกว่าค่าที่คาดไว้ในภาวะทำงานปกติ ในที่สุดค่าเอาต์พุตของส่วนประกอบ I จะมีค่ามากโดยมีเงื่อนไขว่าอยู่ในขณะทำงาน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Windup” ของส่วนประกอบ I

ในขณะที่เกิด Windup นั้นใช้ระยะเวลาในการนำค่าส่วนประกอบ I เข้าสู่ภาวะปกติและในที่สุดจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นที่น่าพอใจ จากการสังเกตการณ์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้า Step Input มีค่ามากจะทำให้การบังคับเอาต์พุตของตัวควบคุมยากเกินกว่าที่กำหนด ในการเพิ่มค่า Set Point ที่มีค่ามากเกินกว่า Overshoot ของกระบวนการปรับจูนและนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดจาก Windup ส่วน “Anti-Windup” คือปฏิกิริยาทางกลที่ต้านทาน Windup ของตัวประกอบ I ในหลายงานวิจัยของปฏิกิริยาทาง Anti-Windup ที่ได้รับการรายงานซึ่งได้รับคำแนะนำที่ไม่ซับซ้อนแต่มีวิธีการที่ได้ผลอยู่บ่อยในเวลาดต่อมา



ภาพที่ 2.22 แสดงภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของปฏิกิริยาทางกลเพื่อรักษาระบบ

การควบคุมสมัยใหม่ส่วนมากใช้ส่วนประกอบทางดิจิทัล และปฏิกิริยาทางกล Anti-Windup มีโครงสร้างตามปกติภายใต้ข้อบ่งชี้งาน แต่น่าเสียดายที่รายละเอียดของการใช้งานดิจิทัลให้เกิดผลไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของบทความนี้ ดังนั้นการอธิบายตามหัวข้อนี้ค่อนข้างจะอยู่ในเชิงความคิด เมื่อตัวควบคุม PID ถูกประมวลผลทางดิจิทัล ส่วนประกอบทั้งสามฟังก์ชัน (เช่นส่วนประกอบ P, I และ D ถูกนำไปใช้บ่อยครั้ง ดังภาพที่แสดงฝั่งซ้ายของภาพที่ 2.21 ดังนั้นการ Integral สามารถนำไปใช้อย่างอิสระ และการอิมิตัวของส่วนประกอบทางฝั่งขวาของภาพที่ 2.21 เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเพิ่มขึ้นของสัญญาณทางอินพุตซึ่งมากเกินไปที่ส่งสัญญาณ ไปยังตัวขับเร็ว ปฏิกิริยาทางกล Anti-Windup สามารถทำการสร้างโดยองค์ประกอบเหล่านั้นอินพุต v และเอาต์พุต u ของตัวประกอบในสถานะอิมิตัวที่ได้รับการเปรียบเทียบถ้าสัญญาณทั้งสองแตกต่างกัน เช่นถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทาง Integral จะหยุดการทำงาน (ซึ่งหมายถึง เอาท์พุท ของตัวประกอบ I ที่คงเดิม) เพื่อที่จะชดเชยจาก การเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ Windup ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบอิมตัวนั้นมักไม่ค่อยมีการใช้ในตัวควบคุมดิจิตอล ปฏิกริยาทางกลเดียวกัน (ตามทฤษฎี) สามารถสร้างโดยการวัดเอาท์พุทที่เป็นไปตามจริงของตัวขับเคลื่อน การประยุกต์ใช้งานมากมายของปฏิกริยาทางกล Anti-Windup ที่ใช้ประโยชน์ได้ เช่นเดียวกับปฏิกริยาทางกลอื่นๆ ภายใต้พื้นฐานทางทฤษฎีที่แตกต่างกัน

ข) สมการอันดับสองของตัวควบคุม PID

ฟังก์ชันถ่ายโอน Closed-loop $G_{yr1}(s)$ และ $G_{yd1}(s)$ ของระบบควบคุมตามภาพที่ 2.16 ที่ได้จาก r ไปสู่ y และจาก d ไปสู่ y ตามลำดับดังสมการนี้

$$G_{yr1}(s) = \frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)}, G_{yd1}(s) = \frac{P(s)}{1+P(s)C(s)} \quad (2.5.13)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันถ่ายโอน Closed-Loop สองส่วนซึ่งเกี่ยวข้องกัน โดย $P(s)\{1 - G_{yr1}(s)\} = G_{yd1}(s)$ และไม่สามารถแยกจากกันได้ ความจริงที่ทำให้เกิดปัญหาในการปรับจูนดังแสดงในภาพที่ 2.21 นั่นคือ การปรับค่าที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณรบกวนที่เป็นสาเหตุของการตอบสนองที่ไม่ดีของ Set Point และในทางกลับกัน พิจารณาจุดในหัวข้อที่ 2.5.5(ค)

ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยตัวชดเชยอื่น $C_f(s)$ เพิ่มเข้าไปสู่ $C(s)$ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.20 ฟังก์ชันถ่ายโอน Closed-loop $G_{yr2}(s)$ และ $G_{yd2}(s)$ ของระบบควบคุมนี้คือ

$$G_{yr2}(s) = \frac{P(s)\{C(s)+C_f(s)\}}{1+P(s)C(s)}, G_{yd2}(s) = \frac{P(s)}{1+P(s)C(s)} \quad (2.5.14)$$

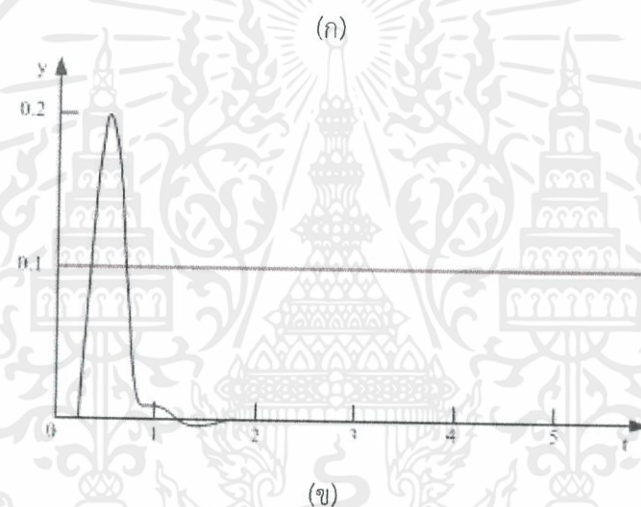
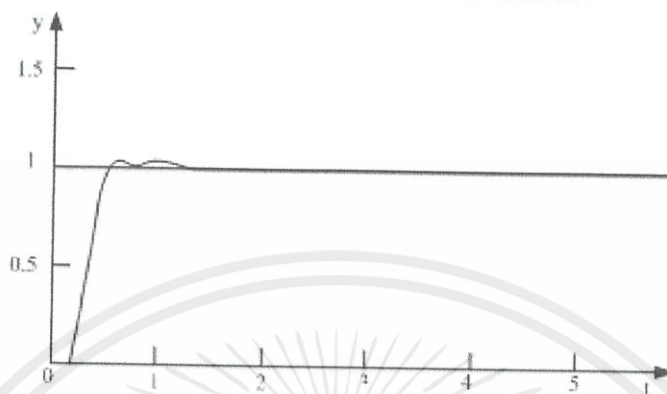
การมีอยู่ของ $C_f(s)$ ในรูปของเศษที่อยู่ในสมการแรก แสดงให้เห็นฟังก์ชันถ่ายโอน Closed-loop ทั้งสองที่สามารถแยกออกโดยการปรับจูนตัวชดเชย $C(s)$ และ $C_f(s)$ ทั้งสอง โครงสร้างตัวควบคุมตามที่แสดงในภาพที่ 2.22 อ้างอิงโดยสมการอันดับสองของตัวควบคุม (Two-Degree-of-Freedom Controller) $C(s)$ ของภาพที่ 2.24 คือตัวชดเชยหลัก (Main Compensator) และ $C_f(s)$ ซึ่งมันคือ ตัวชดเชยประมาณการล่วงหน้า (Feed Forward Compensator) สมการอันดับสองของตัวควบคุม PID (Two-Degree-of-Freedom PID Controller) คือตัวควบคุมที่ประกอบด้วย $C(s)$ ที่ได้จากสมการที่ (2.5.1) และ $C_f(s)$ มาจากสมการนี้

$$C_f(s) = -K_p\{\alpha + \beta T_D D(s)\} \quad (2.5.15)$$

ค่าตัวแปร K_p T_I และ T_D ได้รับการอ้างอิงจากค่าตัวแปร PID พื้นฐานและ α กับ β จากสมการอันดับสองค่าพารามิเตอร์อิสระ (Two-Degree-of-Freedom-Parameters) ถ้านำสมการอันดับสองของระบบควบคุม PID อิสระนำไปแทนค่าสมการที่ (2.5.11) จะมีการตอบสนองดังภาพที่ 2.23 ซึ่งค่า K_p T_I และ T_D ได้รับการกำหนดค่าจากการปรับสัญญาณรบกวนที่เหมาะสม 20% (Optimize The Disturbance Response, 20% Overshoot) ตามสูตรในตารางที่ 2.5 และ α กับ β จำไว้ว่าค่าสัญญาณรบกวนนั้นไม่

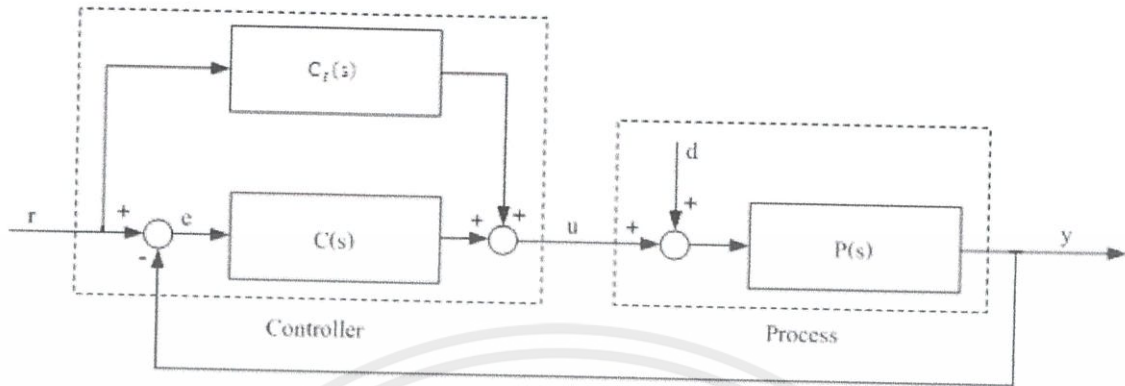
แม้ว่าการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตั้งเส้นกราฟจริงที่แสดงในภาพที่ 2.18 และการตอบสนองเข้าสู่ Set Point แสดงให้เห็น Overshoot เล็กน้อยเพราะว่าค่าเวลาที่กำหนดโดยประมาณใกล้เคียงกับเส้นประในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.23 แสดงภาพการตอบสนองสัญญาณในรูปสมการอันดับสองของระบบควบคุม PID
(ก) แสดงสัญญาณตอบสนอง Unit-Step เข้าสู่ Set Point
(ข) แสดงการตอบสนอง Unit-Step ของสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.24 แสดงภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการอันดับสอง

ค) รูปแบบที่ใช้โดยทั่วไป

จากการอธิบายก่อนหน้านี้ ฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (2.17) และ (2.18) รับการใช้งานเป็นตัวอย่างของกระบวนการจำลอง แต่ยังไม่มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับทฤษฎีการปรับจูนที่เที่ยงตรงที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับความสามารถของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่และระบบเซ็นเซอร์ ดังนั้นรูปแบบที่ใช้โดยทั่วไปที่คาดไว้ นั้นตามตัวอย่างของการจำลองอื่นๆสำหรับกระบวนการที่สามารถควบคุมด้วยตนเองและสำหรับกระบวนการที่สามารถควบคุมด้วยตนเองและสำหรับกระบวนการ Integrating

$$P(s) = \frac{K}{(1+Ts)^n} e^{-Ls} \text{ และ } P(s) = \frac{K}{Ts(1+Ts)^n} e^{-Ls} \quad (2.5.16)$$

เมื่อ K, T และ L คือพารามิเตอร์ด้านบวกและ n คือพารามิเตอร์เชิงตัวเลขด้านบวกนั้นคือค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับจากการตอบสนองของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการจริงอย่างไรก็ตามไม่ใช่เรื่องง่ายในการหาค่าตัวแปรเชิงตัวเลข n ซึ่งเป็นพื้นฐานในขณะทำการวัดเพียงอย่างเดียวและบางทฤษฎีหรือพื้นฐานความรู้จากการทดลองนั้นจำเป็นสำหรับการคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนถัดไปได้ถูกนำมาใช้ในลักษณะเฉพาะเมื่อกระบวนการแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อการแกว่งเช่นกัน

$$P(s) = \frac{K}{1+2Ts+T^2s^2} e^{-Ls} \text{ และ } P(s) = \frac{K}{Ts(1+2Ts+T^2s^2)} e^{-Ls} \quad (2.5.17)$$

เมื่อ K, ζ, T และ L คือพารามิเตอร์บวกเมื่อ $0 < \zeta < 1$ (ส่วนประกอบของระบบ)

ง) วิธีการปรับจูนอื่นๆสำหรับพารามิเตอร์ต่างของ PID

วิธีการปรับจูนแบบเก่าได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.5.5(ค) โดยมีคุณสมบัติดังนี้ กระบวนการของการกำหนดสมมติฐานอย่างมีนัยสำคัญ (ในกรณีของ Ziegler-Nicholes ด้วยวิธีการตอบสนองต่อความไวสูงสุด) หรือการทดลองที่ชัดเจน (ในกรณีของ Ziegler-Nicholes ด้วย Step Response และ Chien-Hrones-Reswick) เพื่อ

กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (2.5.4) หรือ (2.5.5)

ค่าปรับจูนที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆของ PID นั้นได้รับจากสูตรคำนวณของระบบพารามิเตอร์ต่างๆนั้น ได้รับอิทธิพลโดยตรงและข้อมูลของการทดลองจริง

คุณสมบัติแรกคือข้อบกพร่องของวิธีการแบบเก่าเมื่อพิจารณาไปประยุกต์ใช้กับการดำเนินงานที่มีข้อจำกัดหรือจะเรียกว่าการปรับค่าที่เหมาะสมนั้นไม่มีความจำเป็น และบางครั้งห่างไกลจากการปรับค่าจริงในสถานการณ์ที่ขึ้นอยู่กับความเป็นจริงซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการที่ (2.17) หรือ (2.18) นั้นไม่สำคัญแต่สามารถประมาณค่าจากคุณลักษณะของกระบวนการจริง โดยเฉพาะ ปัญหาใหญ่เมื่อมีความหน่วง L ของกระบวนการที่สั้นมากและนานมากนั้นอธิบายคร่าวๆจากลักษณะภายนอกขอบเขต $0.5 \leq L/T \leq 1.0$ (จำไว้ว่านี่คือช่วงระยะเวลาที่แนะนำสำหรับย่านที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิธีการของ Chien-Hrones-Reswick ตามการบันทึกในตารางที่ 2.2) คุณสมบัติที่สองคือวิธีการของความหน่วงในกรณีที่สามารถประยุกต์ใช้งานโดยต่อเนื่อง ในอีกกรณีหนึ่งที่สามารถให้ความหมายตามความบกพร่องในกรณีนี้ไม่มีเนื้อที่พอที่จะปรับปรุงผลลัพธ์โดยใช้ข้อมูลอย่างละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการที่สามารถหาได้จากทฤษฎีที่ศึกษาและวิธีการวัดที่ถูกต้อง จากหลายๆความพยายามสามารถสร้างการชดเชยสำหรับข้อบกพร่องนี้ของวิธีการแบบเก่า อันดับแรกตารางและสูตรที่ได้จากการปรับค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ PID ทำให้เกิดรายละเอียดของกระบวนการทดลองที่มากขึ้นอาทิเช่น สมการที่ (2.5.15) และ (2.5.16)

อันดับสองในหลายความเห็นของการพิจารณาทฤษฎีต่างๆสามารถนำไปใช้พัฒนาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานตามการปรับจูนพื้นฐานตามลักษณะของการตอบสนองทางความถี่ของอัตราป้อนกลับที่ช้า (และค่าศูนย์) ของฟังก์ชันถ่ายโอน (Close-Loop) $G_{yr}(s)$ ตัวชี้วัดคุณสมบัติ Time Domain ในสมการที่ (2.5.8) และ(2.5.9) หรือตัวชี้วัดคุณสมบัติ Frequency-Domain ในภายหลังการที่กล่าวถึงภาวะที่ดีที่สุด (Modulus Optimum) มีวิธีการ โดยการอ้างถึงวิธีแก้ปัญหสำหรับกรณีที่ค่าความหน่วงมีค่าใกล้เคียงศูนย์และกระบวนการที่สามารถจำลองโดยฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีเหตุผล การแสดงตัวอย่างของกระบวนการขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีรูปแบบง่ายดังนี้

ทฤษฎีของภาวะที่ดีที่สุด (Modulus Optimum)คือการปรับจูนค่าตัวแปรต่างๆของตัวควบคุม ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน (Close-Loop) $G_{yr}(s)$ จากค่า Set Point r ไปสู่กระบวนการปรับค่า y เพื่อแก้ปัญหาตามเงื่อนไขถัดไป

$$(a) G_{yr}(0) = 1, (b) \frac{d^m |G_{yr}(j\omega)|}{d\omega^m} = 0 \quad (2.5.18)$$

เมื่อ $\omega = 0$ สำหรับตัวเลขเชิงบวก m (เริ่มจาก 1) ที่เป็นไปได้

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ตอบสนองตามเงื่อนไขด้านบนเรียกว่าภาวะที่ดีที่สุด (Modulus Optimum) สมการอันดับสองและสามของฟังก์ชันถ่ายโอนในสภาวะนี้คือ

$$G_{MO}(s) = \frac{1}{1 + \sqrt{2} T_{MO}s + T_{MO}^2 s^2} \quad (2.5.19)$$

$$G_{MO}(s) = \frac{1}{(1 + T_{MO}s) + T_{MO}s + T_{MO}^2 s^2} \quad (2.5.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่จำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในวิธีการปฏิบัติของภาวะที่ดีที่สุด (Modulus Optimum) โครงสร้างของตัวควบคุม ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และชนิดของตัวชดเชย(s) $C(s)$ และ $C_f(s)$ ในกรณีของสมการอันดับสองของตัวควบคุมอิสระ (Two-Degree-of-Freedom Controller) โดยเป็นอันดับแรก ดังนั้นลำดับของฟังก์ชันถ่ายโอน (Close-Loop) $G_{yr}(s)$ ที่ได้จากระบบการและการเลือกตัวควบคุม ท้ายที่สุดค่าตัวแปรของตัวควบคุมและตัวแปรของ $G_{MO}(s)$ หาได้จากสมการ $G_{yr}(s)$ แทนด้วย $G_{MO}(s)$

$$G_{yr}(s) = G_{MO}(s) \quad (2.5.21)$$

ในกรณีของสมการอันดับหนึ่งของระบบควบคุมอิสระ (ในภาพที่ 1) $G_{yr}(s)$ ในฝั่งซ้ายมือของสมการที่ (2.5.21) ควรมีค่าเท่ากับ $G_{yr1}(s)$ ที่ได้จากสมการที่ (2.5.12) และกรณีของสมการอันดับสองของตัวควบคุมอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 ที่ $G_{yr}(s)$ หาได้จากสมการที่ (2.5.3) บางครั้งสามารถเกิดขึ้นตามสมการที่ (2.5.21) ที่ไม่สามารถกำหนดชนิดของตัวควบคุมควรพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในกรณีที่สามารถอธิบายตามมาด้วยขอบข่ายการทำงานของตัวควบคุม PID จากตัวอย่างการใช้งานของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าดังในสมการที่ (2.5.18) อันดับแรก ให้เราศึกษากรณีสำหรับการเลือกสมการอันดับหนึ่งของตัวควบคุม PID และ $C(s)$ ในการตั้งค่าตัวแปรชนิด P สำหรับในกรณีนี้อันดับของ $G_{yr1}(s)$ จะกลายเป็นอันดับสอง ดังนั้น $G_{MO}(s)$ ของสมการที่ (2.5.10) ควรนำไปใช้ในสมการด้านขวามือของสมการที่ (2.5.21) ในกรณีนี้ค่าที่เราไม่ทราบของสมการคือ K_p ใน $C(s)$ และ T_{MO} ของ $G_{MO}(s)$ สมการที่ (2.5.21) มีวิธีการดังต่อไปนี้

$$K_p = \frac{1}{2K_{ED}} T_{MO} = \sqrt{2} T_{ED} \quad (2.5.22)$$

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ได้ออกแบบไว้ด้านบนแสดงให้เห็นค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัวเป็นศูนย์ (Non-Zero Steady-State) ไปยังการรบกวนทาง Input (Step Disturbance) และความชันของ Set Point ทาง Input มีจุดประสงค์คือการสร้างค่าทั้งสองให้เป็นศูนย์ในภายหลังด้วยเช่นกัน ตัวควบคุม PID ควรกำหนดว่าเป็นชนิด PI หรือ PID ในกรณีของตัวควบคุมชนิด PI มีการศึกษาดังนี้

อันดับแรก ให้ดูค่าสมการที่ (2.5.21) มีวิธีการคำนวณสำหรับสมการอันดับหนึ่งของ PID อิสระเมื่อ $C(s)$ ถูกใช้ในตัวควบคุมชนิด PI อันดับของ $G_{yr1}(s)$ จะกลายเป็นอันดับสามและ $G_{MO}(s)$ ของสมการที่ (2.5.20) ถูกนำไปแทนค่าในฝั่งขวาของสมการที่ (2.5.21) ด้วยการคำนวณง่าย ๆ จะมีค่าเท่ากับ $G_{yr1}(s)$ ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์เสมอ (เช่นตัวประกอบ $T_I s + 1$ แสดงอยู่ในรูปของตัวเลข) จึงมีค่าไม่เท่ากับ $G_{MO}(s)$ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ในทางเดียวกันสมการที่ (2.5.21) นั้นไม่มีวิธีสำหรับตัวเลือกนี้หมายความว่า การเปลี่ยนระดับของตัวควบคุมต้องได้รับการพิจารณาเนื่องจากการใช้ตัวควบคุมชนิด PI ทำงานคือ สิ่งที่สำคัญของทฤษฎีในการออกแบบตามธรรมชาติซึ่งจะพิจารณาในรูปแบบของสมการอันดับสองของตัวควบคุม PID อิสระ ในการทำงานของตัวควบคุมชนิด PI โดยลำดับ ตามสมการที่ (2.5.1) โดยให้ $T_D = 0$ และในสมการที่ (2.5.15) กำหนดให้ $\beta = 0$ สำหรับตัวควบคุมนี้ สมการอันดับสองของ $G_{yr2}(s)$ จะกลายเป็นอันดับสามเช่นกัน และ $G_{MO}(s)$ ของสมการที่ (2.5.21) โดยนำไปแทนค่าในฝั่งขวามือของสมการที่ (2.5.21) ค่าที่เราไม่ทราบของสมการที่ (2.5.21) ในกรณีนี้คือ α , K_p , T_I , และ T_{MO} ในการคำนวณของสมการที่ (2.5.21) โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = 1, K_p = \frac{1}{2K_{ED}}, T_I = 4T_{ED}, T_{MO} = 2T_{ED} \quad (2.5.23)$$

สำหรับค่าต่างๆด้านบนมีอัตราป้อนกลับที่มีสัดส่วนสมดุลกันดังที่แสดงตาม Bode Diagram และด้วยเหตุผลนี้การปรับจูนมีอัตราป้อนกลับที่มีความสมดุล (Symmetrical Optimum)

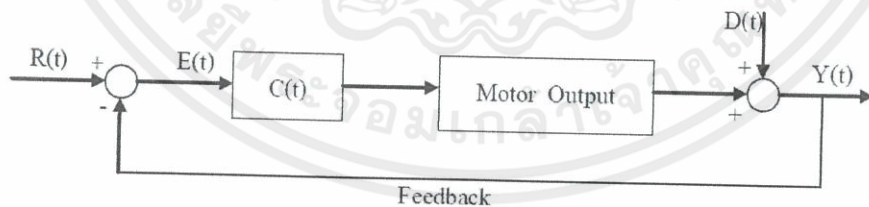
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของ PI-Control, PD-Control และ PID-Control

คุณสมบัติ PID -Control	PI-Control	PD-Control	PID-Control
ความไวต่อการตอบสนอง	เร็ว	เร็วมาก	เร็วมาก
ค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว	ศูนย์	มีให้เห็น	ศูนย์

ตารางที่ 2.7 แสดงเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของ P-Control, I-Control และ D-Control

คุณสมบัติ PID -Control	P-Control	I-Control	D-Control
ความไวต่อการตอบสนอง	เร็ว	ช้า	เร็วมากๆ
ค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว	มีให้เห็น	เป็นศูนย์	ไม่สามารถควบคุมได้
หมายเหตุ	ไม่สามารถใช้งานได้ตามลำพัง		

2.6 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน



ภาพที่ 2.25 แสดง Block Diagram ของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน

$R(t)$ = Set Point

$Y(t)$ = ตัววัดการตอบสนอง(Encoder)

$E(t)$ = Error

$D(t)$ = การรบกวนภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C(t)$ = ตัวควบคุม(Microcontroller)

θ = เอ้าท์พุท

หลักการทำงานคือ เมื่อ $R(t)$ คือ Set Point ที่ระบบต้องการ มีมุมเป็นเอ้าท์พุท (ค่ามุมที่ระบบต้องการคือมีมุม $\theta = 0$ องศา) เมื่อมุมของลูกตุ้มเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการรบกวนจากภายนอก $D(t)$ จะทำให้ $Y(t)$ หรือ Encoder ที่ทำหน้าที่เป็นตัววัดการตอบสนองก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยค่าของการเปลี่ยนแปลงก็คือ $E(t) = \text{Error}$ และ $Y(t)$ หรือ Encoder ก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ของการเปลี่ยนแปลงของลูกตุ้มย้อนกลับไป Summing ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณกับ Input $R(t) = \text{Set Point}$ แล้วจึงทำการคำนวณและประมวลผลหลังจากนั้นทำการปรับค่า PWM ให้เหมาะสมเพื่อสั่งให้วงจรขับมอเตอร์ ทำการขับมอเตอร์ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

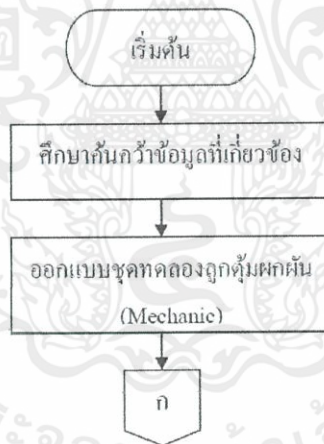
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถนำมาออกแบบสร้างเป็นชุดควบคุมลูกตุ้มผกผัน ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์ต่างๆ และส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานด้วยระบบควบคุม PID ซึ่งได้ทำการออกแบบโดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

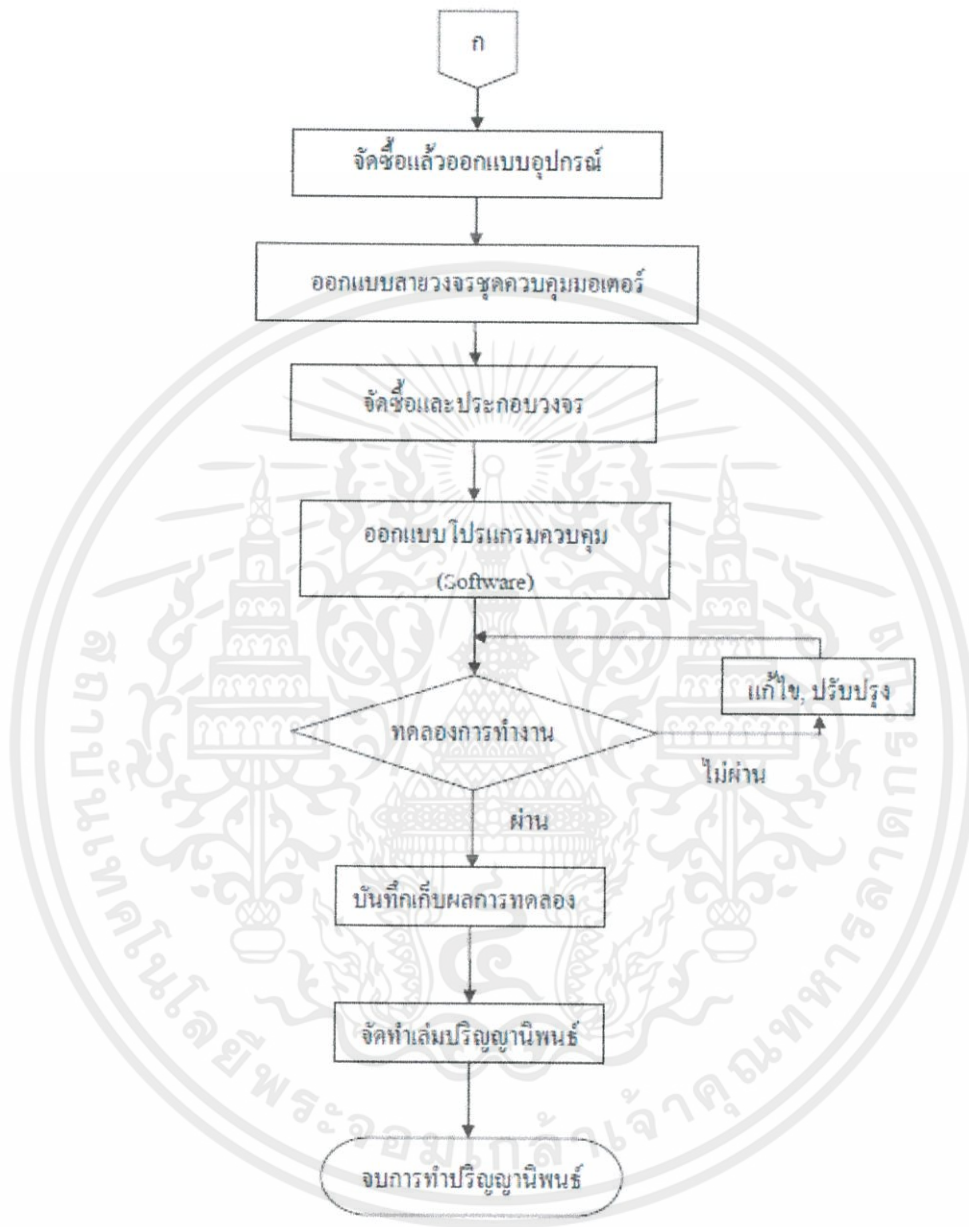
- 3.1 แผนการดำเนินงาน
- 3.2 วงจรขับมอเตอร์
- 3.3 วงจรควบคุมและประมวลผล
- 3.4 โปรแกรมหลักลูกตุ้มผกผัน
- 3.5 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1(ต่อ) แสดงแผนผังการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

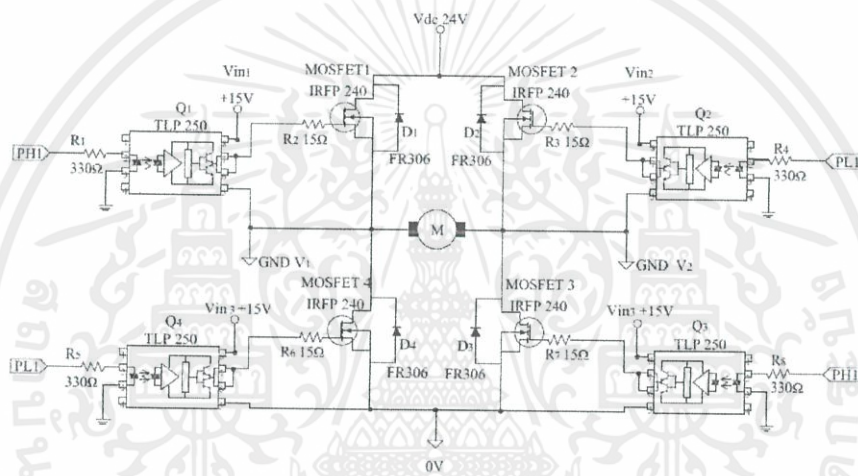
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการจัดทำปฏิญานิพนธ์

PROGRESSION FOR WORK																												
Case Study	August				September				October				November				December				January				February			
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
1. ศึกษาแบบ inverted pendulum	←→																											
2. ออกแบบ Hardware	←→																											
3. สร้าง Hardware					←→																							
4. ศึกษาวิธีการวางระบบ									←→																			
5. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์									←→																			
6. ออกแบบตัวควบคุม													←→															
7. ทำการทดลองและปรับปรุงแก้ไข																	←→											
8. แก้ไขและสรุปผลการทดลอง																									←→			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรขับมอเตอร์

วงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge ใช้มอสเฟส IRFP240 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลังซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์เป็นคู่ไขว้กัน (Complement) เมื่อได้รับสัญญาณ PWM PL1 และ สัญญาณ PWM PH1 ที่ทำการขยายสัญญาณจากวงจรขับเกตแล้ว (คือเมื่อ TLP250-Q1 และ TLP250-Q3 อยู่ในสถานะ ON TLP250-Q2 และ TLP250-Q4 จะอยู่ในสถานะ OFF ในทางกลับกันเมื่อ TLP250-Q1 และ TLP250-Q3 อยู่ในสถานะ OFF TLP250-Q2 และ TLP250-Q4 จะอยู่ในสถานะ ON นั่นเอง) โดยมี D1, D2, D3 และ D4 เป็น Fast Recovery Diode เป็นตัวป้องกันกระแสย้อนกลับจากมอเตอร์ เนื่องจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์

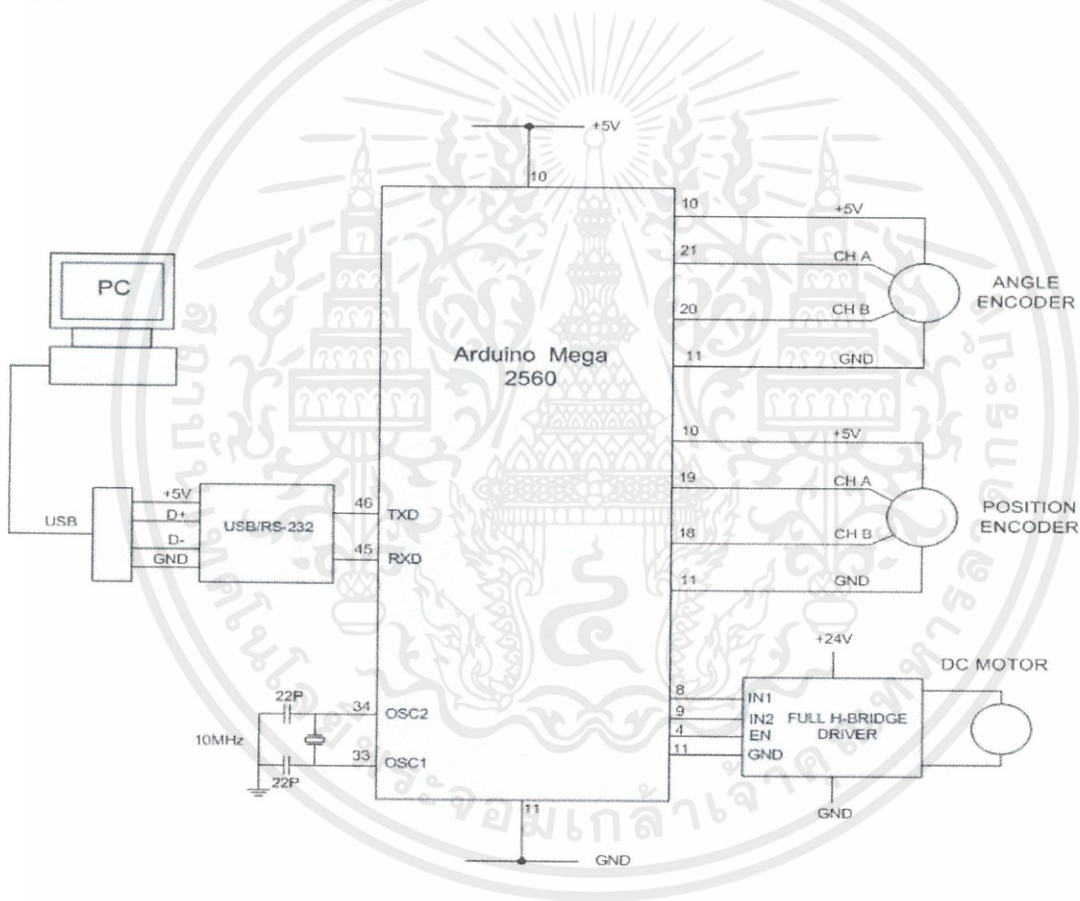


ภาพที่ 3.2 วงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรควบคุมและประมวลผล

สำหรับชุดควบคุมระบบลูกตุ้มผกผันนี้ ใช้การประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega2560 ขนาด 12 บิต ใช้สัญญาณนาฬิกาจากคริสตอลความถี่ 16 MHz โดยรับอินพุต จากเอ็นโค้ดเดอร์เป็นสัญญาณพัลส์ที่มีมุมต่างเฟสกัน 90° ระหว่างสัญญาณ A กับ B โดยสัญญาณ A ต่อเข้าพอร์ต 21 สัญญาณ B ต่อเข้าพอร์ต 20 สำหรับเอ็นโค้ดเดอร์วัดมุมและสัญญาณ A ต่อเข้าพอร์ต 19 สัญญาณ B ต่อเข้าพอร์ต 18 สำหรับเอ็นโค้ดเดอร์วัดระยะทาง ซึ่งเป็นโมดูลสำหรับรับรับค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อทำการประมวลผลแล้วจ่ายสัญญาณ PWM ให้ชุดขับ H-Bridge จากพอร์ต 4 โดยมีสัญญาณ in1 และ in2 เป็นตัวควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ สัญญาณ in1 ออกจากพอร์ต 8 สัญญาณ in2 ออกจากพอร์ต 9



ภาพที่ 3.3 วงจรควบคุมและประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อธิบายโปรแกรมหลักลูกตุ้มผกผัน

```
#define Ts 0.001;

#define fc 2.98

#include <Encoder.h>

Encoder Cart(18, 19);

Encoder Rod(20, 21);

void setup(){

  Serial.begin(115200);

  pinMode(4,OUTPUT);

  pinMode(13,OUTPUT);

  pinMode(8,OUTPUT);

  pinMode(9,OUTPUT);

  //ด้านบนเป็นการกำหนด Port บน Arduino เพื่อให้สามารถแสดงผลได้

  noInterrupts(); // disable all interrupts

  TCCR1A = 0;

  TCCR1B = 0;

  TCNT1 = 65536-16000000/256*Ts; // preload timer 65536-16MHz/(256/2Hz)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TCCR1B |= (1 << CS12);           // 256 prescaler

TIMSK1 |= (1 << TOIE1);         // enable timer overflow interrupt

interrupts();                     // enable all interrupts

}

//ด้านบนทั้งหมดเป็น Header เพื่อเปิดใช้งาน Library ต่างๆ เช่น Encoder หรือ Realtime operating system

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

float ref1,ref2;

float k1=51.5,k2=-0.00456,k3=0.0958,k4=-0.067,enable_swing;

//เป็นที่เซตค่าการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อEncoderมีการเปลี่ยนแปลง

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

/**/ Saturation function ***/

float sat_fnc=0;

float sat(float u,float MAX,float MIN){

    if(abs(u)<=MAX){

        sat_fnc=u;

    }

    if(abs(u)>MAX){

        if(u>0){

            sat_fnc=MAX;

        }

    }

}

```

เอกสาร if(u==0) { ... } ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        sat_fnc=0;
    }

    if(u<0){
        sat_fnc=MIN;
    }

}

return(sat_fnc);
}

```

//เป็นฟังก์ชัน Loop ควบคุมค่า U ในการใช้งาน

////////////////////////////////////

```
float x,x_dot,xold;
```

```
float Angle,Angle_dot,Angle_old;
```

```
float x1,x2,x3,x4;
```

```
float w;
```

```
float uf=0,e=0,e1,z=0;
```

```
int u;
```

// ประกาศตัวแปร เพื่อนำไปใช้

```
void SensorReadAndConvert(){
```

```
    w=2*PI*fc;
```

```
    x=(float)Cart.read()*2*PI/512; // Cart Position ตัวหารมาจาก Pulse ของ Encoder คูณ 4
```

```
    Angle=(float)Rod.read()*2*PI/4096; // Rod Angle ตัวหารมาจาก Pulse ของ Encoder คูณ 4
```

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x_dot=(float)(x-xold)/Ts;          //สมการอ่านค่า Encoder Cart

Angle_dot=(Angle-Angle_old)/Ts;    //สมการอ่านค่า Encoder Rod

x1=Angle;

x2=x2+(-2*Pi*fc*x2+2*Pi*fc*Angle_dot)*Ts; //เป็นสมการเพื่อสร้างความเสถียร low part filterแก้ค่าที่ได้

x3=x;

x4=x4+(-2*Pi*fc*x4+2*Pi*fc*x_dot)*Ts; //เป็นสมการเพื่อสร้างความเสถียรlow part filterแก้ค่าที่ได้

xold=x;

//กำหนดให้ เมื่อ ผ่านไป 1รอบ นำค่า x ที่ได้ไปเป็น ค่า xold เมื่อเริ่ม loop ใหม่

Angle_old=Angle;

//กำหนดให้ เมื่อ ผ่านไป 1รอบ นำค่า Angle ที่ได้ไปเป็น ค่า Angleold เมื่อเริ่ม loop ใหม่

}

////////////////////////////////////

float X,Y,Z,Ymax=255,Ymin=-255;

void Tracking_Anti_windup()

{

e=ref1-x1;

//กำหนดตัวแปร Error คือผลต่างระหว่างมุมที่อ่านได้จาก encoder ของ Rod กับมุมที่อยากให้เป็น

e1=ref2-x3;

// กำหนดตัวแปร Error คือผลต่างระหว่างระยะที่อ่านได้จาก encoder ของ Cart กับมุมที่อยากให้เป็น

Y=(k1*e+k2*x2+k3*e1+k4*x4); // สมการ การควบคุม u=-kx

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

uf=255*Z;

}

void SentPID2Drive(void){

u=(int)uf;

analogWrite(4,abs(u));

if(uf>255){uf=255;};

if(uf<-255){uf=-255;};

// เป็นการกำหนดค่า gain ไม่ให้เกิน 255

if(uf>0){

digitalWrite(8,HIGH);

digitalWrite(9,LOW);

}

else if(uf<0)

{

digitalWrite(8,LOW);

digitalWrite(9,HIGH);

}

//เป็นการกำหนดทิศทางการเคลื่อนไหว

}

ISR(TIMER1_OVF_vect)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TCNT1 = 65536-16000000/256*Ts;

SensorReadAndConvert();

Tracking_Anti_windup();

SentPID2Drive();

}

void Serial_monitor(){

Serial.print(x1,2);

Serial.print("\t");

Serial.print(x3,2);

Serial.print("\t");

Serial.print(Z);

Serial.print("\t");

Serial.print(ref1);

Serial.println();

//ประกาศค่าเพื่อ พล็อตกราฟจากโปรแกรม

}

void loop()

{

Serial_monitor();

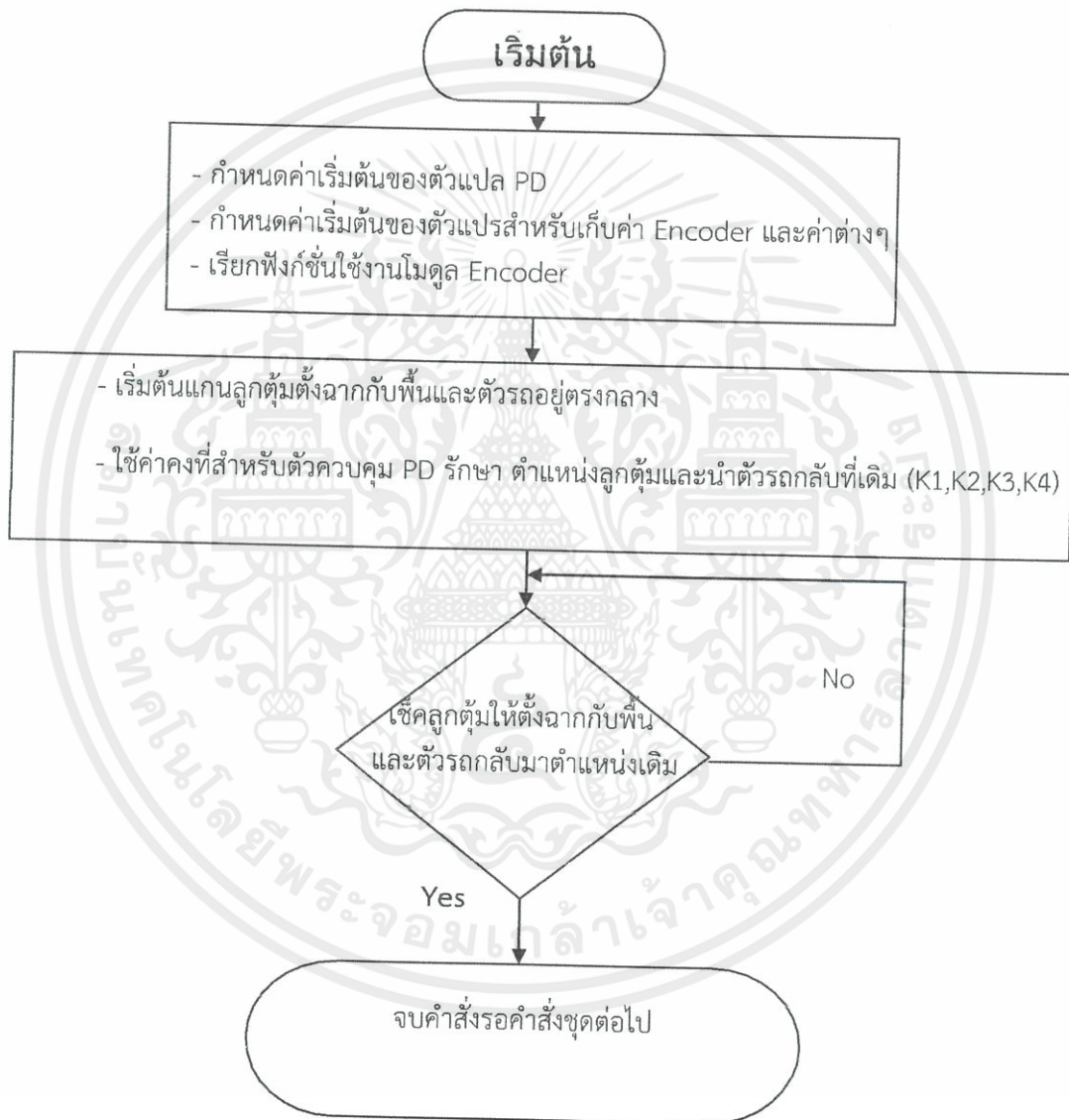
//คำสั่งเพื่อพล็อตกราฟจากโปรแกรม

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

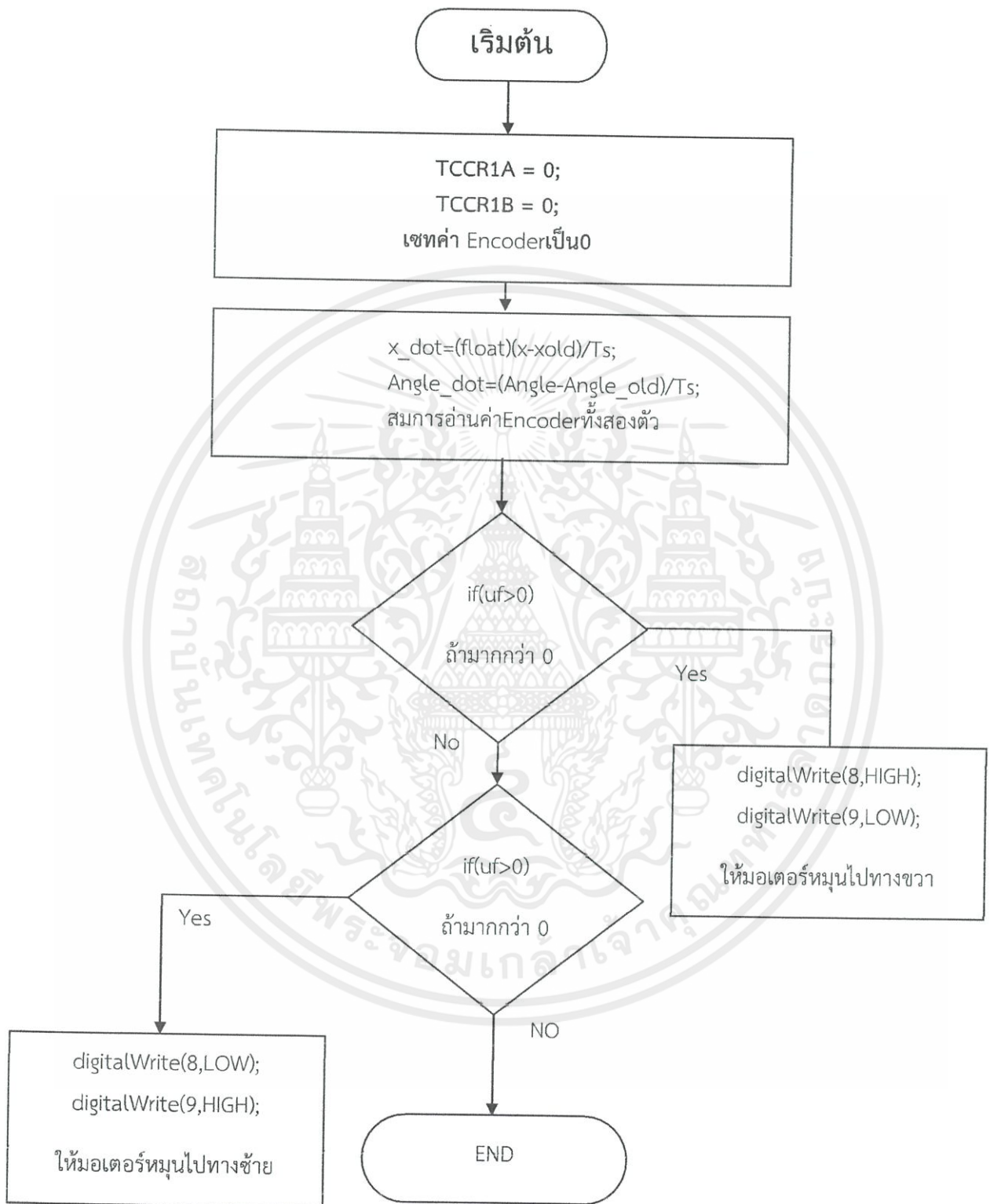
3.5 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

การออกแบบระบบควบคุมลูกตุ้มผกผันจำเป็นต้องมีโปรแกรมในการควบคุม ปริญญาโทนี้ได้เลือกใช้ภาษาซี (C Language) ในการออกแบบซอฟต์แวร์ โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือในการออกแบบคือ Arduino 1.0.5 เป็นโปรแกรมสำหรับพิมพ์ code เพื่อสั่งงานให้แก่ระบบ โดยสามารถเขียนแผนผังกระบวนการทำงานของโปรแกรมเป็นโฟลว์ชาร์ตได้ดังนี้



ภาพที่ 3.4 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 3.5 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานของมอเตอร์
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากวิธีการดำเนินงานที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 สามารถนำการดำเนินงานของการออกแบบและสร้างแบบจำลองการยกตัวด้วยระบบปิกหมุนแบบป้อนกลับ สำหรับภาระในบทยนี้จะเป็นการนำเสนอผลการดำเนินงานและผลการทดลองการทำงานซึ่งสามารถนำมาพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

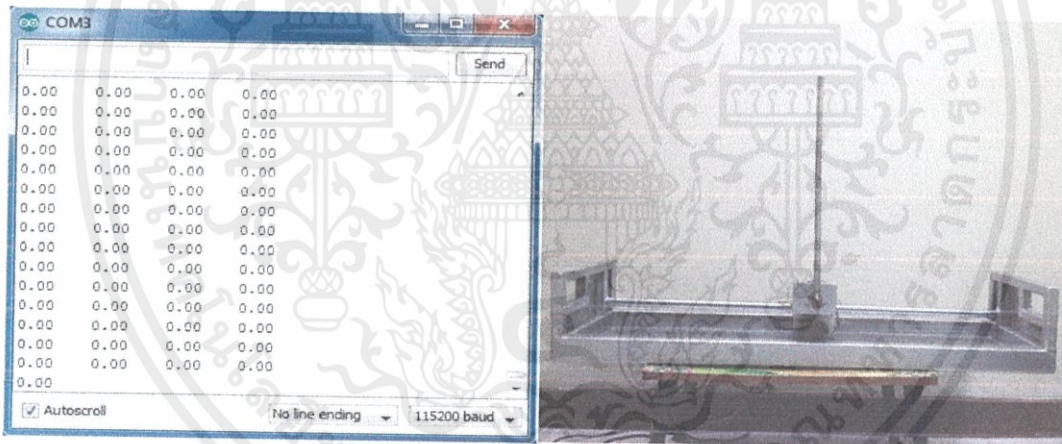
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

- 4.1.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 4.1.2 ชุดควบคุม สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์

4.2 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน

4.2.1 การแสดงค่ามุม ระยะทาง และ Error

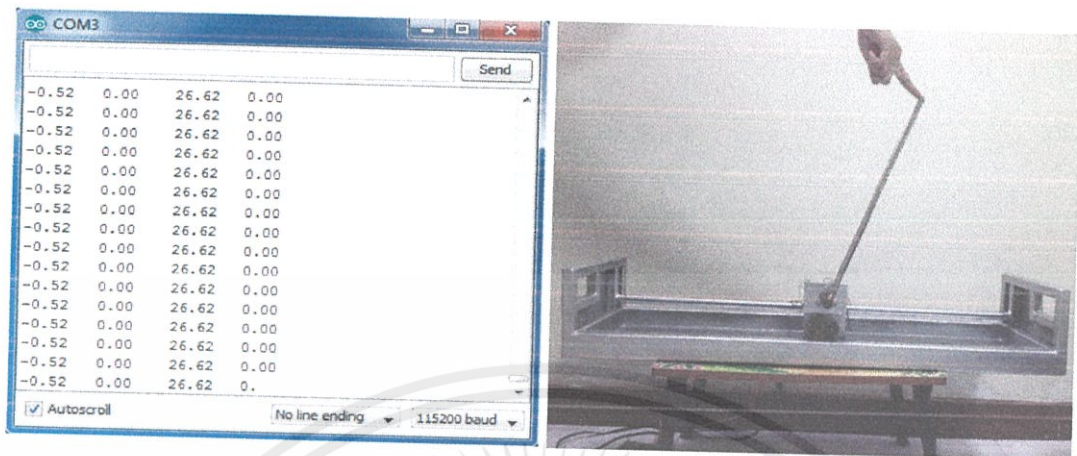
จากภาพที่ 4.1 แสดงภาพค่ามุมที่ได้มาจากเอ็นโค้ดเดอร์ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณอินพุตจะทำการตรวจสอบองศาเอาต์พุตโดยการป้อนกลับจากเอ็นโค้ดเดอร์ และจะเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตเพื่อหาค่าความคาดเคลื่อน และทำการประมวลผลตามสมการ PD ในที่นี้เอ็นโค้ดเดอร์อ่านค่าได้ 0



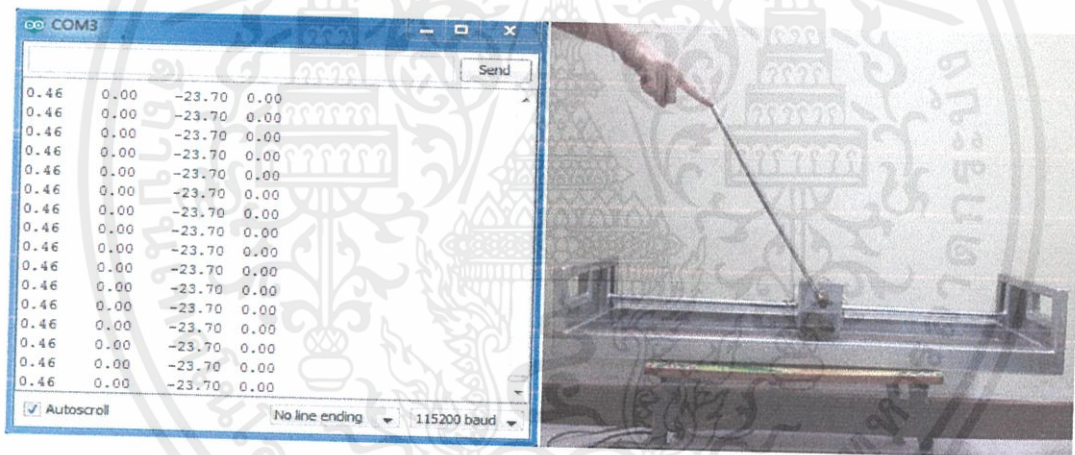
ภาพที่ 4.1 แสดงค่ามุม ระยะทาง และ Error

ผลการอ่านค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีผลทำให้มอเตอร์หยุดและอยู่กับที่และเมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เอ็นโค้ดเดอร์สามารถอ่านค่าได้แล้วส่งผลมาทำการคำนวณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าลुकตุ้มเอียงไปทางด้านใด องศาเท่าใด จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



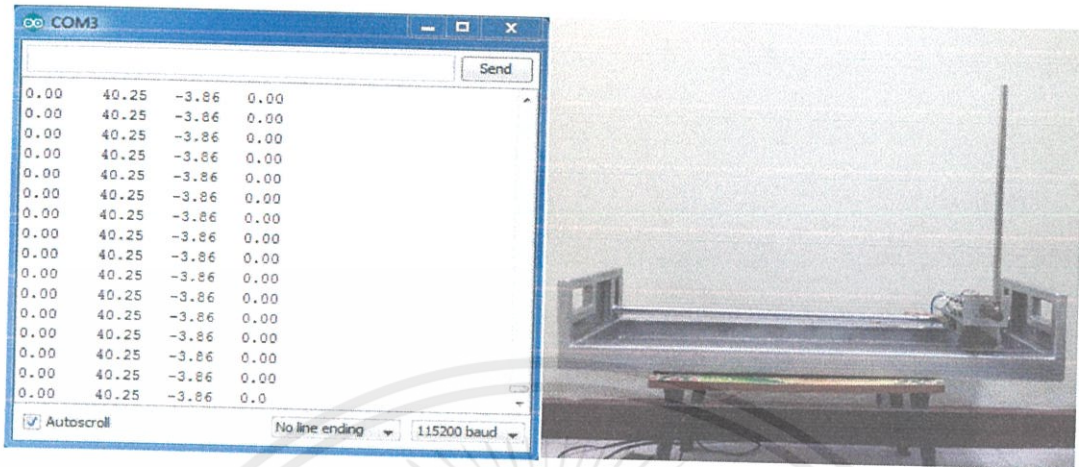
ภาพที่ 4.2 ผลการวัดค่าเมื่อลูกตุ้มเอียงไปทางด้านขวา



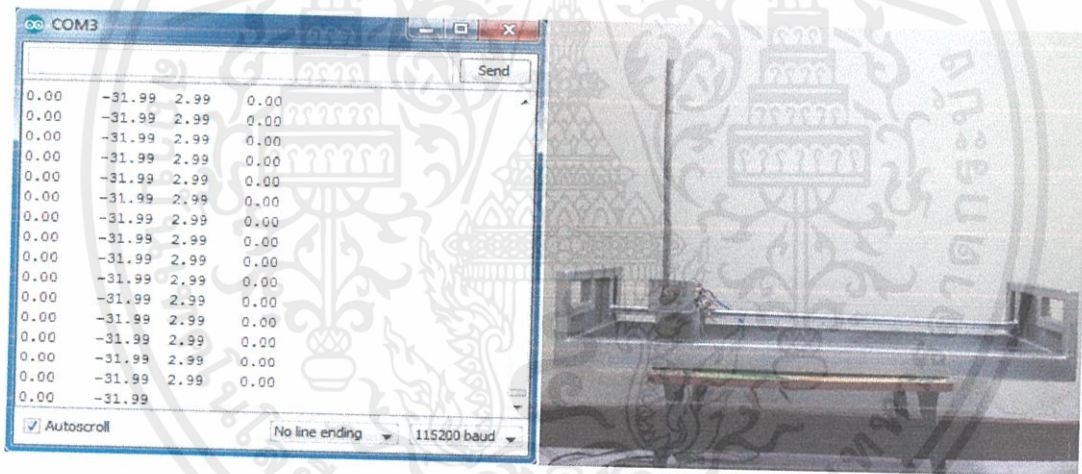
ภาพที่ 4.3 ผลการวัดค่าเมื่อลูกตุ้มเอียงไปทางด้านซ้าย

จากภาพที่ 4.2,4.3 ผลการอ่านค่าจะเกิดขึ้นเมื่อมุมลูกตุ้ม เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านซ้ายและขวาที่มุมประมาณ 0-5 องศา หรือ 0-0.043611(ในโปรแกรมคำนวณค่าเป็นπ)จากมุมเดิมที่ตั้งฉากกับพื้น จากการอ่านค่าจะทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนมารับลูกตุ้มจากองศาที่เปลี่ยนไปประมาณ 0-5 องศา เมื่อแกนลูกตุ้มมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 5 องศา มอเตอร์จะไม่สามารถตามความเร็วในการตกได้ทันเนื่องจากกำลังไม่พอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านขวา



ภาพที่ 4.5 ผลการวัดค่าเมื่อตัวรถอยู่ทางด้านซ้าย

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 ผลการอ่านค่าจะเกิดขึ้นเมื่อตัวรถเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านซ้ายและขวา จากตำแหน่งเดิมที่ตั้งอยู่ จากการอ่านค่าจะทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนเพื่อขยับตัวรถมาที่ตำแหน่งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการปรับจูน

K1	K2	K3	K4	การตอบสนองของชุดทดลองที่มีต่อค่า K1,K2,K3,K4
51.51	-0.00562	0.0943	-0.105	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
	-0.00534	0.0967	-0.092	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
	-0.00502	0.0972	-0.078	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
	-0.00456	0.0985	-0.067	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มและนำตัวรถกลับมาที่เดิมได้
	-0.00413	0.0995	-0.052	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่ไม่สามารถนำตัวรถกลับมาที่เดิม
	-0.00354	0.1024	-0.034	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่ไม่สามารถนำตัวรถกลับมาที่เดิม
	-0.0025	0.1053	-0.019	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่ไม่สามารถนำตัวรถกลับมาที่เดิม

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K1 คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K1	K2	K3	K4	การตอบสนองของชุดทดลองที่มีต่อค่า K1,K2,K3,K4
20.7	-0.00456	0.0943	-0.105	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
35.2		0.0967	-0.092	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
48.9		0.0972	-0.078	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
51.51		0.0985	-0.067	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มและนำตัวรถกลับมาที่เดิมได้
60.7		0.0995	-0.052	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้และรถไม่สามารถกลับมาที่เดิม
86.3		0.1024	-0.034	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้และรถไม่สามารถกลับมาที่เดิม
100		0.1053	-0.019	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้และรถไม่สามารถกลับมาที่เดิม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K2 คงที่

K1	K2	K3	K4	การตอบสนองของชุดทดลองที่มีต่อค่า K1,K2,K3,K4
20.7	-0.00562	0.0985	-0.105	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
35.2	-0.00534		-0.092	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
48.9	-0.00502		-0.078	ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
51.51	-0.00456		-0.067	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มและนำตัวรถกลับมาที่เดิมได้
60.7	-0.00413		-0.052	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่จะล้มลงเมื่อตัวรถพยายามกลับมาที่เดิม
86.3	-0.00354		-0.034	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่จะล้มลงเมื่อตัวรถพยายามกลับมาที่เดิม
100	-0.0025		-0.019	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้แต่จะล้มลงเมื่อตัวรถพยายามกลับมาที่เดิม

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K3 คงที่

K1	K2	K3	K4	การตอบสนองของชุดทดลองที่มีต่อค่า K1,K2,K3,K4
20.7	-0.00562	0.0943		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
35.2	-0.00534	0.0967		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
48.9	-0.00502	0.0972		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะตอบสนองช้าเกินไป
51.51	-0.00456	0.0985	-0.067	สามารถเลี้ยงลูกตุ้มและนำตัวรถกลับมาที่เดิมได้
60.7	-0.00413	0.0995		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะการขยับของตัวรถไม่สอดคล้องกับการเลี้ยงลูกตุ้ม
86.3	-0.00354	0.1024		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะการขยับของตัวรถไม่สอดคล้องกับการเลี้ยงลูกตุ้ม
100	-0.0025	0.1053		ไม่สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้เพราะการขยับของตัวรถไม่สอดคล้องกับการเลี้ยงลูกตุ้ม

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการปรับจูนและการตอบสนองเมื่อ K4 คงที่

จากตารางผลการปรับจูนค่าที่เหมาะสมในการเลี้ยงลูกตุ้มอยู่ที่ $K_{P,Rod} = 51.5$, $K_{D,Rod} = -0.00456$, $K_{P,car} = 0.0958$, $K_{D,car} = -0.067$ โดยที่ลูกตุ้มมีมุมและ Error เข้าใกล้ศูนย์ที่สุดและมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้ดี แต่อย่างไรก็ตามในการปรับจูนจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของระบบเสียก่อนจึงจะทำให้การปรับจูนมีความแม่นยำ มีข้อดีคือค่าที่ได้จากการปรับจูนลักษณะนี้ ระบบสามารถสามารถเลี้ยงลูกตุ้มไว้ในตำแหน่งที่มีความสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

จากการที่ได้ทำการออกแบบสร้างและทำการทดลองปรับจูนค่า PD ในควบคุมการทำงานของชุดทดลอง ลูกตุ้มผกผัน สามารถสรุปผลและปัญหาจากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในปฏิญานินพนธ์นี้ได้ทำการสร้างชุดควบคุมประมวลผล โดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 12 บิตตระกูล Arduino รุ่น Mega 2560 เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและคำนวณสมการ PD ที่ใช้ภาษาซี (C language) ในการป้อนชุดคำสั่งสำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำการเขียนข้อมูลลงบน Arduino เพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ในการเลี้ยงแท่งลูกตุ้มผกผัน ส่วนชุดเซ็นเซอร์ได้ทำการเลือกใช้เอ็นโค้ดเดอร์ (Optical Encoder) เป็นตัวส่งสัญญาณพัลส์ป้อนกลับให้กับชุดควบคุมโดยมีความละเอียดของสัญญาณที่ 1,024 พัลส์/รอบ ส่งสัญญาณป้อนกลับที่วัดได้จากมุมของแท่งลูกตุ้มผกผัน ซึ่งมีมุมในการเลี้ยงแท่งข้างละไม่เกิน 5 องศา จากตำแหน่งตั้งตรง ให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลสำหรับการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ โดยการจ่ายสัญญาณ PWM ให้กับชุดวงจร ขับมอเตอร์ซึ่งเป็นวงจรแบบ H-Bridge ที่ใช้มอเตอร์เฟดจำนวน 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลัง ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์เป็นคู่ไขว้กัน (Complement) โดยมี Fast Recovery Diode เป็นตัวป้องกันกระแสย้อนกลับจากมอเตอร์ขณะสวิตช์อยู่ในสภาวะ Off ในการขับมอเตอร์กระแสตรงขนาด 24 โวลต์ ให้สามารถเลี้ยงลูกตุ้มผกผันได้ โดยแท่งลูกตุ้มผกผันเป็นโลหะแท่งกลางทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 9.525 มิลลิเมตร ความยาว 40 เซนติเมตร น้ำหนัก 0.412 กรัม ซึ่งยึดติดอยู่กับชุดเซ็นเซอร์ในการป้อนกลับสัญญาณไปสู่ชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลด้วยการควบคุมแบบ PD ในการปรับจูนค่าที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงลูกตุ้มผกผัน การปรับจูนค่า PD ได้ทำการปรับจูนด้วยวิธี Empirical Method คือการใช้ผลที่ได้จากการปฏิบัติจริง โดยใช้การปรับจูนผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อเปลี่ยนค่าในโปรแกรมควบคุม เพื่อทำการปรับจูน P และ D ตามลำดับ ซึ่งค่าที่เหมาะสมในการสวิงลูกตุ้มเพื่อที่จะให้สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้มีค่าอยู่ที่ $K_{p,Rod} = 51.5$, $K_{D,Rod} = -0.00456$, $K_{p,car} = 0.0958$, $K_{D,car} = -0.067$ โดยลูกตุ้มจะมีมุม Error เข้าใกล้ศูนย์ที่สุด และมีการตอบสนองที่รวดเร็วทำให้สามารถเลี้ยงลูกตุ้มได้ดี

จากการทดสอบการทำงานจริงของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ ผลการทดลองจากการทำงานจริงของระบบลูกตุ้มผกผัน จะเห็นว่าโดยรวมแล้วชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ การเลี้ยงลูกตุ้มทางด้านบนในช่วงมุมระหว่าง -5 องศา ถึง 5 องศา นั้นสามารถทำได้จริง โดยที่ยังมี Error ของระบบให้เห็นอยู่ แต่ก็สามารถเลี้ยงลูกตุ้มไว้ในตำแหน่งที่มีความสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ในการจัดทำปฏิญานินพนธ์ชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน พบปัญหาและแนวทางในการแก้ไขดังนี้

5.2.1 การรับสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์มีความคาดเคลื่อนเนื่องจากหน้าสัมผัสที่สร้างขึ้นมาอาจมีความผิดพลาดทางด้านอุปกรณ์ ทำให้รับค่าสัญญาณเอ็นโคเดอร์ผิดพลาด

5.2.3 การออกแบบชุดทดลองให้มีเพลาดียวทำให้น้ำหนักถ่ายเทไปทางด้วยหน้าทำให้มอเตอร์ทำงานหนักเนื่องจากโหลดที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 วัสดุที่ใช้สร้างชุดทดลองทำมาจากเหล็ก จึงทำให้เกิดการสั่นและมีความเสถียรที่น้อยลง

5.2.5 ชุดทดลองที่สร้างขึ้นนั้นยังมีจุดบกพร่องอยู่ เนื่องจากการใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดน้อยในการสร้างส่วนประกอบต่างๆ

5.2.6 ปัญหาจากกำลังของมอเตอร์ที่น้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถตอบสนองต่อความเร็วในการตกของลูกตุ้มได้ทัน จึงทำให้มีมุมในการแกว่งลูกตุ้มที่น้อยมาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการจัดทำปริญญาโทชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน มีแนวทางในการพัฒนาต่อไปดังนี้

5.3.1 การออกแบบสร้างชุดทดลอง หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องควรออกแบบให้ได้สัดส่วนและมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมในส่วนต่างๆต่อไป

5.3.2 ในการควบคุมการแกว่งของชุดทดลองลูกตุ้มผกผันให้สามารถแกว่งขึ้นเองได้นั้น ควรเลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือหน่วยประมวลผลอื่นๆ ที่มีความเร็วในการทำงานที่ไวมากขึ้น เนื่องจากจะต้องมีการคำนวณต่างๆ ตามการควบคุมที่ซับซ้อนมากขึ้น

5.3.3 ในการเลือกมอเตอร์ควรเลือกที่กำลังมากพอที่จะรับโหลดของตัวรถและตามความเร็วในการตกของลูกตุ้มได้ทัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Gawthrop, 1991; Bryant and Halikias, 1995;Chait et al., 1999; Gera and Horowitz, 1980;Thompson and Nwokah, 1994.

เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

"ระบบควบคุมพลวัต การวิเคราะห์ การออกแบบ และการประยุกต์ (Dynamical Control Systems Analysis, Design and Applications)" สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2551 (ISBN 978-974-03-2205-4)

M.W. Spong and M. Vidyasagar. Dynamics and Control of Robot Manipulators. John Wiley, 1989

Katsuhiko Ogata, Modern control engineering (Edition 5), Prentice Hall, 2010,
ISBN 0136156738, 9780136156734

Simple Inverted Pendulum Cart Dynamics Lagrangian Development by Jaspren Patenaude

Nise, N. S., 2000. Control Systems Engineering. John Wiley & Sons, US.

Franklin, G. F., 2002. Feedback Control of Dynamic Systems. Prentice Hall, US.

Renou, S., and Saydy, L., "Real time control of an inverted pendulum based on approximate linearization", in Proceedings of Canadian Conf. on Electrical and Computer Eng., Calgary, Alta, USA., May 1996.

Sprenger, B., Kucera, L. and Mourad, S., 1998. Balancing of an inverted pendulum with a SCARA robot. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 3, Issue 2, pp. 91 - 97.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chung, C. Y., Lee, S. M., Lee, J. W., and Lee, B. H., "Balancing of an inverted pendulum with a kinematically redundant robot", in Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Kyongju, South Korea,

สำเร็จ เต็มราม, เดชฤทธิ์ มณีธรรม. คัมภีร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC (Microcontroller PIC).
กรุงเทพฯ, 2553.

ดอนสัน ปงผาบ. การเขียนโปรแกรมภาษาซีในงานควบคุม. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.

ประจัน พลังสันติกุล. การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ds PIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C. กรุงเทพฯ , 2551.

พจนานฎ สุวรรณมณี. เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , 2548.

สมบูรณ์ มณีโชติ, สันติ พลพิชัย, นายศุภกิจ ศรีทอง . ลูกตุ้มผกผันควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. ปรินทิพพานิช
อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,2556.

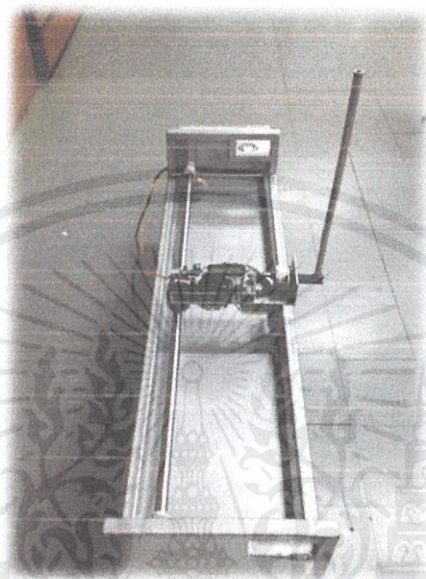
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



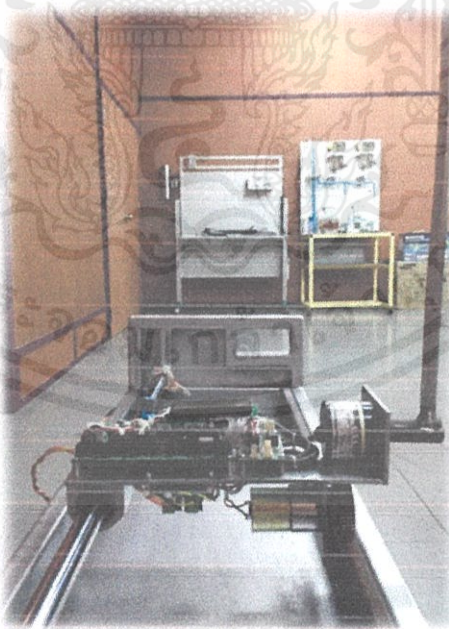
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ภาพชิ้นงานสมบูรณ์ ลายวงจร และอุปกรณ์ที่สำคัญของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน



ภาพที่ ก-6 แสดงโครงสร้างชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ภาพที่ ก-7 แสดงโครงสร้างชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน (ในขณะเลี้ยงลูกตุ้ม) ให้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

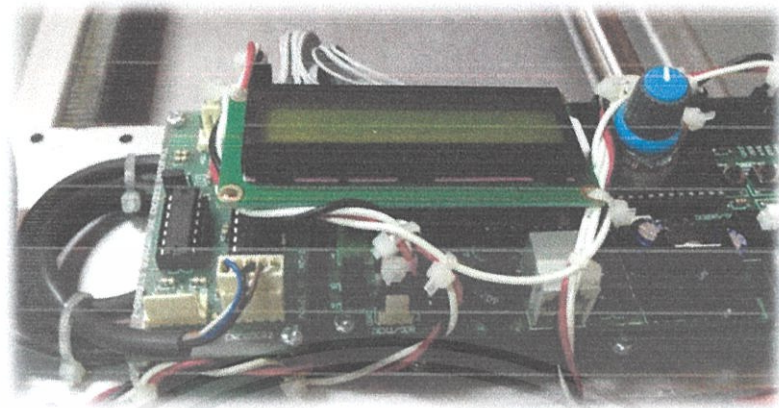


ภาพที่ ก-8 แสดงดีซีมอเตอร์ที่ใช้ในชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน

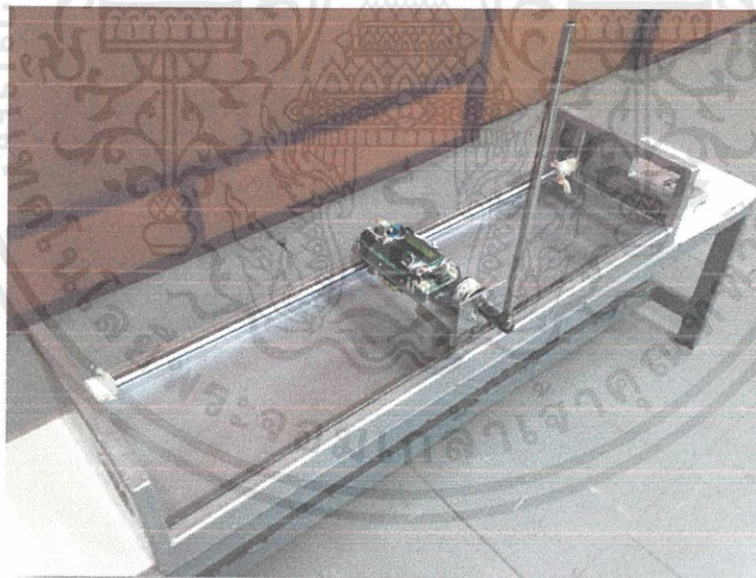


ภาพที่ ก-9 แสดงEncoder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

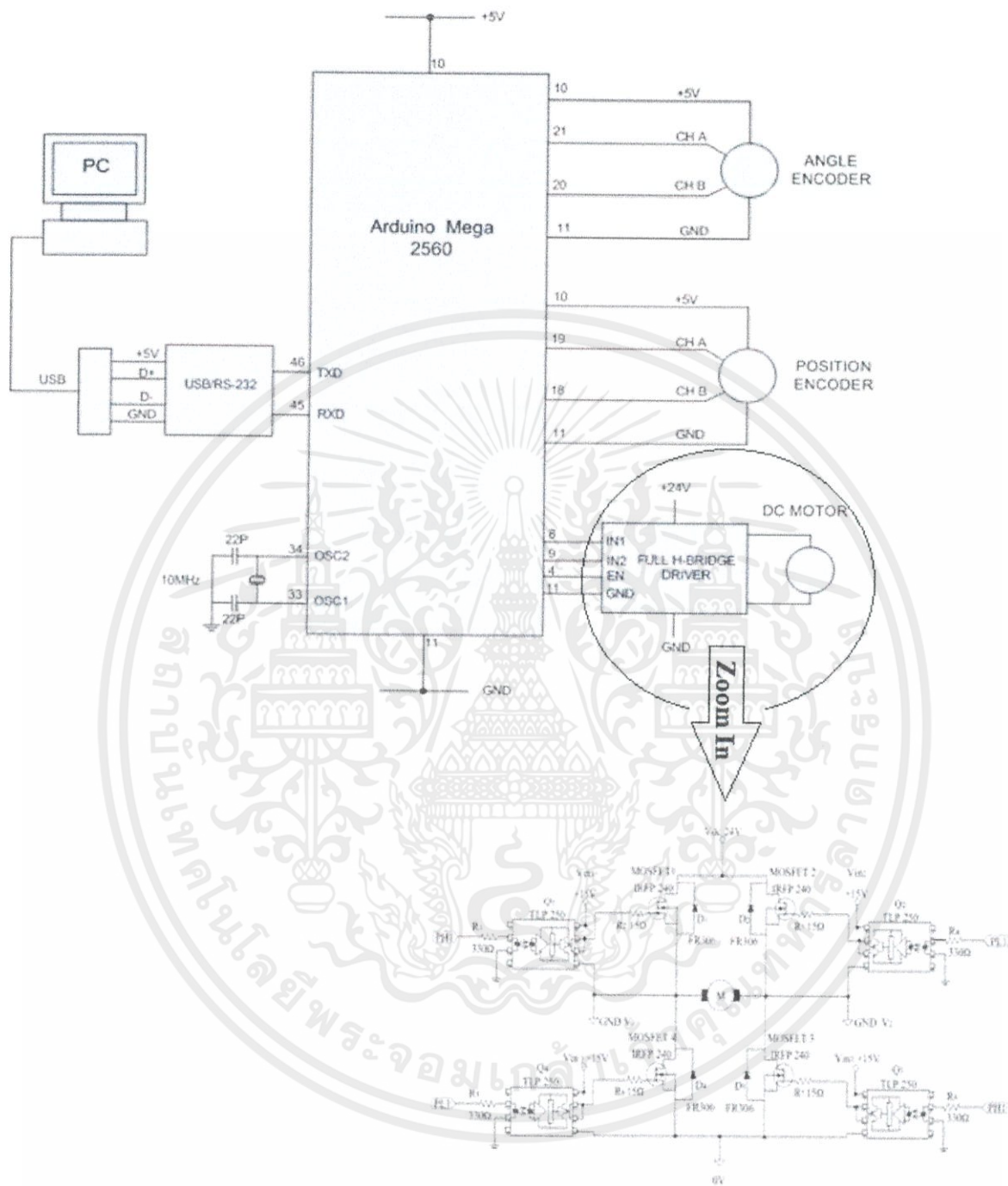


ภาพที่ ก-10 แสดงลักษณะของวงจรควบคุมชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน



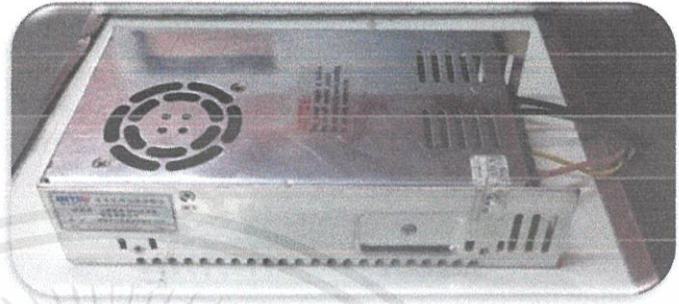
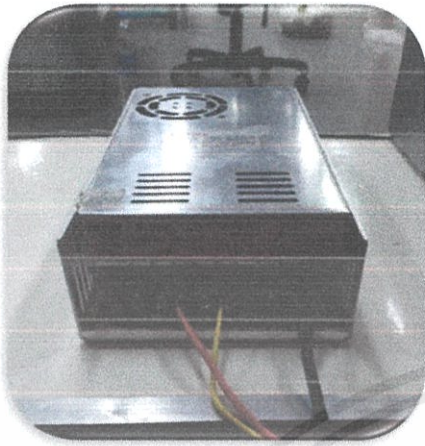
ภาพที่ ก-11 ภาพชิ้นงานสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

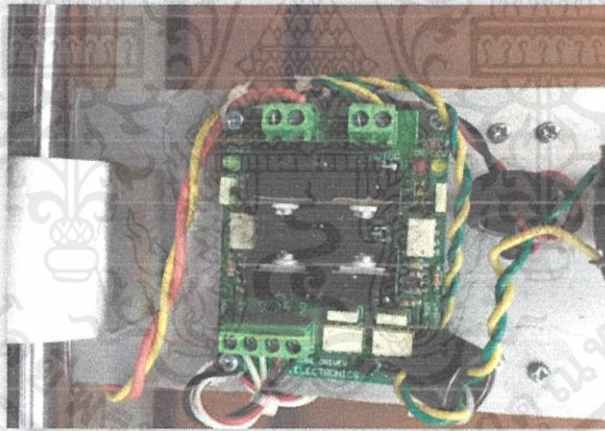


ภาพที่ ก-12 แสดงวงจรรวมของชุดทดลองลูกตุ้มผกผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก-13 Power Supply DC 12 V สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์



ภาพที่ ก-14 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ดิจิทัลแบบ H-Bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

Source Code

```
#define Ts 0.001;
#define fc 2.98
#include <Encoder.h>
Encoder Cart(18, 19);
Encoder Rod(20, 21);
//Encoder Rod(2,3);

void setup(){
  Serial.begin(115200);
  pinMode(4,OUTPUT);
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);

  noInterrupts();      // disable all interrupts

  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 65536-16000000/256*Ts;      // preload timer 65536-16MHz/(256/2Hz)
  TCCR1B |= (1 << CS12);      // 256 prescaler
  TIMSK1 |= (1 << TOIE1);      // enable timer overflow interrupt
  interrupts();      // enable all interrupts
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
////////////////////////////////////  
float ref1,ref2;  
float k1=51.5,k2=-0.00456,k3=0.0958,k4=-0.067,enable_swing;  
////////////////////////////////////
```

```
/** Saturation function */  
float sat_fnc=0;  
  
float sat(float u,float MAX,float MIN){  
  
if(abs(u)<=MAX){  
    sat_fnc=u;  
}  
if(abs(u)>MAX){  
    if(u>0){  
        sat_fnc=MAX;  
    }  
    if(u==0){  
        sat_fnc=0;  
    }  
    if(u<0){  
        sat_fnc=MIN;  
    }  
}  
  
return(sat_fnc);  
}
```

```
////////////////////////////////////
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float x,x_dot,xold;
float Angle,Angle_dot,Angle_old;
float x1,x2,x3,x4;
float w;
float uf=0,e=0,e1,z=0;
int u;

void SensorReadAndConvert(){
    w=2*PI*fc;

    x=(float)Cart.read()*2*PI/512;    // Cart Position4
    Angle=(float)Rod.read()*2*PI/4096; // Rod Angle

    x_dot=(float)(x-xold)/Ts;        //Encoder Cart
    Angle_dot=(Angle-Angle_old)/Ts;  //Encoder Rod

    x1=Angle;
    x2=x2+(-2*PI*fc*x2+2*PI*fc*Angle_dot)*Ts;
    x3=x;
    x4=x4+(-2*PI*fc*x4+2*PI*fc*x_dot)*Ts;

    xold=x;
    Angle_old=Angle;
}
////////////////////////////////////

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
float X,Y,Z,Ymax=255,Ymin=-255;
void Tracking_Anti_windup()
```

```
{
  e=ref1-x1;
  e1=ref2-x3;
  Y=(k1*e+k2*x2+k3*e1+k4*x4);
  Z=sat(Y,Ymax,Ymin);
  uf=255*Z;
}
```

```
void SentPID2Drive(void){
```

```
  u=(int)uf;
  analogWrite(4,abs(u));
  if(uf>255){uf=255;};
  if(uf<-255){uf=-255;};
  if(uf>0){
    digitalWrite(8,HIGH);
    digitalWrite(9,LOW);
```

```
  }
  else if(uf<0)
```

```
  {
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(9,HIGH);
```

```
  }
```

```
}
```

```
ISR(TIMER1_OVF_vect)
```

```
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TCNT1 = 65536-16000000/256*Ts;
SensorReadAndConvert();
Tracking_Anti_windup();
SentPID2Drive();
}
void Serial_monitor(){
  Serial.print(x1,2);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(x3,2);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(Z);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(ref1);
  Serial.println();
}
void loop()
{
  Serial_monitor();
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้